

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Jerko Vlahović

Zagreb, 2012. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

doc. Dr. sc. Branko Bauer, dipl. ing.

Student:

Jerko Vlahović

Zagreb, 2012. godina

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija uz uporabu navedene literature.

Zahvaljujem se mentoru doc.dr.sc. Branku Baueru na cjelokupnom vođenju kroz izradu rada, kako teoretskog tako i eksperimentalnog dijela. Zahvaljujem se i djelatnicima Katedre i Laboratorija za ljevarstvo, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Također bih se zahvalio djelatnicima Laboratorija za materijalogrfska ispitivanja te djelatnicima Laboratorija za analizu metala, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Jerko Vlahović

Sadržaj

Popis slika	4
Popis tablica	6
Sažetak.....	7
1. UVOD.....	8
2. ALUMINIJ I ALUMINIJSKE LEGURE.....	9
2.1. Tehnički čisti aluminij.....	9
2.2. Aluminijske legure	12
2.2.1. Ljevačke legure aluminija.....	13
2.2.2. Gnječive legure	19
2.3. Recikliranje aluminija-sekundarni aluminij	19
3. SKRUĆIVANJE METALA I LEGURA.....	21
3.1. Nukleacija i kristalizacija.....	21
3.1.1. Nukleacija	22
3.1.2. Kristalizacija	22
3.1.3. Razvoj dendrita i dendritne strukture	24
3.1.4. Razvoj eutektičke mikrostrukture	26
4. LIVLJIVOST ALUMINIJSKIH LEGURA.....	29
4.1. Utjecaj sastava na livljiivost legure.....	29
4.2. Utjecaj temperature uljevanja na livljiivost.....	31
4.3. Utjecaj na livljiivost usitnjavanjem zrna	32
4.4. Utjecaj kalupnog materijala na livljiivost	34
4.5. Utjecaj kalupnog premaza na livljiivost.....	34
4.6. Utjecaj viskoznosti na livljiivost.....	35
4.7. Utjecaj čistoće taljevine na livljiivost	35
4.8. Utjecaj vodika na livljiivost.....	36
5. METODE ISPITIVANJA	38
5.1. Ispitivanje livljiivosti lijevanjem spirale	38
5.2. Ispitivanje livljiivosti vakuumom	40
5.3. Ostali testovi	41
6. EKSPERIMENTALNI RAD	43

6.1. Utjecaj temperature i sastava materijala na livljivost AlSi legure	43
6.1.1. Izrada jednokratnog pješčanog kalupa	43
6.1.2. Priprema taljevine za ulijevanje.....	47
6.1.3. Rezultati lijevanja u jednokratni pješčani kalup	49
6.2. Utjecaj na livljivost modifikacijom i usitnjavanjem zrna AlSi legure.....	54
6.2.1. Priprema za ulijevanje.....	54
6.2.2. Usitnjavanje zrna legure	57
6.2.3. Modifikacija legure	58
6.2.4. Rezultati Ispitivanja	63
6.3. Ispitivanje kemijskog sastava materijala	67
6.4. Metalografska analiza.....	68
6.4.1. Rezultati metalografske analize	70
7. ZAKLJUČAK	75
LITERATURA	76

Popis slika

Slika 1. Shema proizvodnje aluminija

Slika 2. Svjetska proizvodnja aluminija

Slika 3. Dijagram stanja Al –Si s prikazom mikrostruktura

Slika 4. Dijagram stanja Al-Si

Slika 5. Dijagram stanja Al-Cu

Slika 6. Dijagram stanja Al-Mg

Slika 7. a) Prikaz krivulje hlađenja za čisti metal, b) Prikaz krivulje hlađenja binarne legure

Slika 8. Skupljanje stupolikih kristala: a) početna faza, b) zatvaranje prolaza taljevini

Slika 9. Stvaranje prvih dendrita u talini

Slika 10. Mapa livljivosti binarnih legura

Slika 11. Shematski prikaz dendrita

Slika 12. Stvaranje stupačastog i istoosnog dendrita

Slika 13. Shematski prikaz: (a) Morfologije pravilnog lamelarnog dvofaznog eutektika koji raste u jednom smjeru u pozitivnom temperaturnom gradijentu ; (b) Rast nepravilnog eutektika: grananja fasetirane faze kod λ_b , zaustavljanja kod λ_e i odgovarajući oblik granične površine kruto/tekuće

Slika 14. Shematski prikaz tipova nestabilnosti planarne eutektičke granične površine kruto-tekuće: (a) nestabilnost jedne faze rezultira nastajanjem dendrita jedne faze i interdendritnog eutektika; (b) nestabilnost dviju faza rezultira nastajanjem eutektičkih ćelija ili kolonija u prisustvu trećeg legirajućeg elementa

Slika 15. Utjecaj temperature i nečistoća na livljivost

Slika 16. Krivulja livljivosti ovisno o sastavu Al-Cu legure

Slika 17. Krivulja livljivosti ovisno o sastavu Al-Si legure

Slika 18. Krivulja livljivosti ovisno o sastavu Al-Mg legure

Slika 19. Utjecaj temperature ulijevanja na livljivost

Slika 20. Učinak usitnjavanja zrna ingota: a) neusitnjeno zrno, b) usitnjeno zrno [20]

Slika 21. Utjecaj kalupnog premaza na tečljivost pri temperaturi pregrijavanja od 70°C i 130°C

Slika 22. Uzorci ispitivani pod smanjenim pritiskom: (a) uzorak otplinjavan s argonom i niskim sadržajem vodika; (b) uzorak koji nije otplinjavan i visokim sadržajem vodika

- Slika 23. Livljivost legura s niskim (D) i visokim (G) sadržajem vodika. Standardna devijacija je prikazana vertikalnom linijom
- Slika 24. Prikaz spiralnog kalupa za ispitivanje livljivosti
- Slika 25. Ispitivanje livljivosti s dvije spirale
- Slika 26 Sippova spiralna proba (pravokutna i okrugla)
- Slika 27. Horizontalni vakumski test
- Slika 28. Ispitni uzorak s više kanala
- Slika 29. Model spiralne probe
- Slika 30. Posipanj modela likapodijem I stavljanjem modelnog pjeska
- Slika 31 Sabijanje nakon stavljanja dopunske kalupne mješavine
- Slika 32. Kalupna šupljina gornjaka
- Slika 33. Donjak
- Slika 34. Gotovi kalupi
- Slika 35. Elekrootporna peć
- Slika 36. Mjerenje temperature i preljevanje taline u ljevački lonac
- Slika 37. Gotove spirale
- Slika 38. Lijevanje spirala broj 1
- Slika 39. Lijevanje spirala broj 3
- Slika 40. Lijevanje spirala broj 2
- Slika 41. Lijevanje spirala broj 4
- Slika 42. Usporedba spirala 4 i 10
- Slika 43. Usporedba spirala 6 i 12
- Slika 44. Vaganje aluminjske legure
- Slika 45. Termometar CEM DT-610B
- Slika 46. Kokila [19]
- Slika 47. Predgrijavanje kokile
- Slika 48. Termokreda za određivanje temperature površine
- Slika 49. Ulijevanje taljevine u kokilu
- Slika 50. Vaganje predlegure AlTi10
- Slika 51. Varijacija modificiranosti taline aluminij silicij od nemodificirane (A) do jako modificirane (F)
- Slika 52. Zbivanja pri modificiranju eutektičke legure Al-Si s 12%Si
- Slika 53. Modiklait
- Slika 54. Natrijeva sol na površini taljevine
- Slika 55. Čišćenje troske

Slika 56. Mješanje taljevine

Slika 57. Spirale lijevane na 670°C

Slika 58. Spirale lijevane na 700°C

Slika 59. Spirale lijevane na 730°C

Slika 60. Utjecaj modifikacije kemijskog sastava i usitnjavanja zrna na livljivost Al –Si legura

Slika 61. Livljivost legura pri 710°C

Slika 62. Livljivost legura pri 680°C

Slika 63. Livljivost legura pri 650°C

Slika 64. Spektrometar GDS 850A

Slika 65. Uzorci za ispitivanje kemijskog sastava

Slika 66. Uređaji za brušenje i poliranje uzoraka

Slika 67. Pripremljeni uzorci

Slika 68. Svjetlosni mikroskop Olympus 6X S1“

Slika 69. Prikaz mikrostrukture AlSi12 (200x)

Slika 70. Prikaz materijala AlSi12 (500x)

Slika 71. Prikaz mikrostrukture AlSi12Mg (Cu) (x200)

Slika 72. Prikaz mikrostrukture AlSi12Mg (Cu) (x500)

Slika 73. Prikaz mikrostrukture AlSi12 (x100)

Slika 74. Prikaz mikrostrukture AlSi12 (x200)

Slika 75. Prikaz mikrostrukture modificiranog AlSi12 (x200)

Slika 76. Prikaz mikrostrukture modificiranog AlSi12 (x500)

Slika 77. Prikaz mikrostrukture AlSi12 usitnjenog zrna (X200)

Slika 78. Prikaz mikrostrukture AlSi12 usitnjenog zrna (x500)

Popis tablica

Tablica 1. Fizikalna i mehanička svojstva aluminija

Tablica 2. Osnovna svojstva ljevanih aluminijskih legura

Tablica 3. Podjela i osnovne značajke gnječenih aluminijskih legura

Tablica 4. Dužine spirala za lijevanje serije 1 i 3 (AlSi12Mg (Cu))

Tablica 5. Dužine spirala za lijevanje serije 2 i 4 (AlSi12)

Tablica 6. Dužine spirala ljevanih u metalnoj kokili

Tablica 7. Rezultati ispitivanja kemijskog sastava

Sažetak

Uporaba aluminijski legura značajno se povećava u novije vrijeme. Osim mehaničkih i kemijskih svojstava nužno je poznavanje tehnoloških svojstava kao što su livljivost, sklonost skupljanju, vrućim pukotinama itd.

U teoretskom dijelu se kroz pretraživanje legure proučio i pojasnio pojam livljivosti, te njena ovisnost o raznim uvjetima. U eksperimentalnom dijelu ispitana je livljivost AlSi12 legure te utjecaj obrade taljevine i temperature ulijevanja na livljivost koristeći test spiralnog kanala.

Eksperimentom lijevanja u jednokratne pješčane kalupe utvrdila se ovisnost livljivosti o temperaturi ulijevanja i kemijskom sastavu taljevine. Kod lijeva u kokilu ispitao se utjecaj livljivosti o obradi taljevine kemijskom modifikacijom ili usitnjavanjem zrna. Za modifikaciju legure koristio se Modikalit, natrijeva sol, dok se zrno usitnjavalo predlegurom AlTi10.

Eksperiment obuhvaća i ispitivanje kemijskog sastava, te metalografsku analizu.

1. UVOD

Ljevarstvo je široko rasprostranjena tehnologija kod koje se rastaljeni metal lijeva u kalupe pod utjecajem gravitacije ili neke druge sile, te skrućivanjem zadržava oblik kalupne šupljine. Prednosti ljevarstva su mogućnost dobivanja složene geometrije, mogućnost izrade velikih odljevaka, korištenje velikog broja metala i mogućnost serijske izrade. Ljevarstvo je primijenjeno u mnogim industrijama, a najvažnije su automobilska, građevinska, zrakoplovna industrija, brodogradnja i strojogradnja. Kako bi rezultati lijevanja nekog metala bili što bolji važno je poznavati njegovu livljivost.

Sposobnost taljevine da popuni kalup prije skrućivanja, odnosno livljivost, ima ključnu ulogu za kvalitetu i ispravnost odljevka. Livljivost je kompleksno tehnološko svojstvo koje ovisi o mnogim parametrima. Čimbenici s najveći utjecajem na livljivost su kemijski sastav materijala i temperatura ulijevanja.

Ovim radom posebno će se dotaknuti livljivosti AlSi12 legure. Ispitivanje livljivost biti će podijeljeno u dva dijela, lijevanjem u jednokratne pješčane kalupe i lijevanjem u kokilu. Osim promjena materijala kalupa u eksperimentima će se mijenjati temperature ulijevanja. Osim spomenutih promjena u eksperimentima, AlSi12 leguri će se dodavati dodaci za modifikaciju i usitnjavanje zrna.

2. ALUMINIJ I ALUMINIJSKE LEGURE

2.1. Tehnički čisti aluminij

Aluminij je tehnički materijal koji se vrlo brzo zbog svojih prednosti našao u vrhu po proizvedenoj količini. Osobine koje ga čine izuzetno prisutnim u tehnici su mala specifična težina, dobra vodljivost struje i topline, čvrstoća, te dobra antikorozivna svojstva. Aluminij je pored bakra jedini tehnički čisti metal koji ima masovnu primjenu. To se prvenstveno odnosi na uporabu aluminija za prijenos električne energije. Zbog njegove iznimno povoljne specifične težine svi nadzemni vodovi (dalekovodi) jesu tehnički čisti aluminij. Nadalje elektro instalacije u automobilima su uglavnom aluminijske jer ovaj za razliku od bakra pozitivno utječe na svojstva čelika pri recikliranju.

Dobra otpornost na atmosferilije proizlazi iz stvaranja oksidnog sloja na površini. Zbog navedenih svojstava njegova primjena je česta, a ponajprije u automobilskoj industriji, građevini, strojogradnji te u mnogim drugim industrijama.

Aluminij se u prirodi nalazi u obliku oksida i smjese oksida iz koje se metal izdvaja skupim elektrolitičkim postupkom. Općenito se metal ekstrahira iz oksidne rude zagrijavanjem s jeftinim redukcijskim sredstvom (ugljik u obliku koksa), a dobiveni sirovi metal se rafinira, čime se omogućuje oksidacija većine prisutnih nečistoća.

Najupečatljivija karakteristika aluminija je njegova svestranost. Rasponi fizičkih i mehaničkih svojstava mogu biti razvijeni kod čistog, rafiniranog aluminija, ali naročito kod aluminijskih legura. Tri su glavna svojstva koja određuju primjenu aluminija kao inženjerskog materijala [1]:

1. Povoljan omjer čvrstoće i gustoće (R_m/ρ tzv. *Specifična čvrstoća*), pogotovo kada se koristi u obliku neke od svojih legura. Gustoća aluminija je oko jedne trećine gustoće čelika, ali i bakra i mjedi, pa se aluminij i njegove legure prvenstveno koriste u proizvodnji zrakoplova i vozila.
2. Omjer električne vodljivosti i gustoće najpovoljniji je među svim metalima. Zbog toga aluminij istiskuje bakar iz uporabe za prijenos energije.
3. Aluminij ima velik afinitet prema kisiku, a korozijska postojanost mu je ipak relativno velika i na njoj se osniva široka primjena u graditeljstvu.

Aluminij s kubičnom plošno centriranom kristalnom rešetkom (FCC) je metal izvanredno toplo i hladno oblikovljiv. Postupcima isprešavanja mogu se izvoditi profili vrlo složenih oblika za razne namjene. Valjanjem se mogu proizvesti folije od samo nekoliko μm debljine koje su upotrebljavaju za pakiranje raznih industrijskih i prehrambenih proizvoda. Za te namjene mogu se samo koristiti kvalitetnije vrste aluminija bez nemetalnih uključaka i intermetalnih spojeva željeza i silicija koji mogu u procesu valjanja uzrokovati nastanak pora i rupica.

Primarni aluminij se koristi samo u gnječenom stanju, a ovisno o načinu obrade mehanička svojstva mu se kreću oko vrijednosti danih tablicom 1.

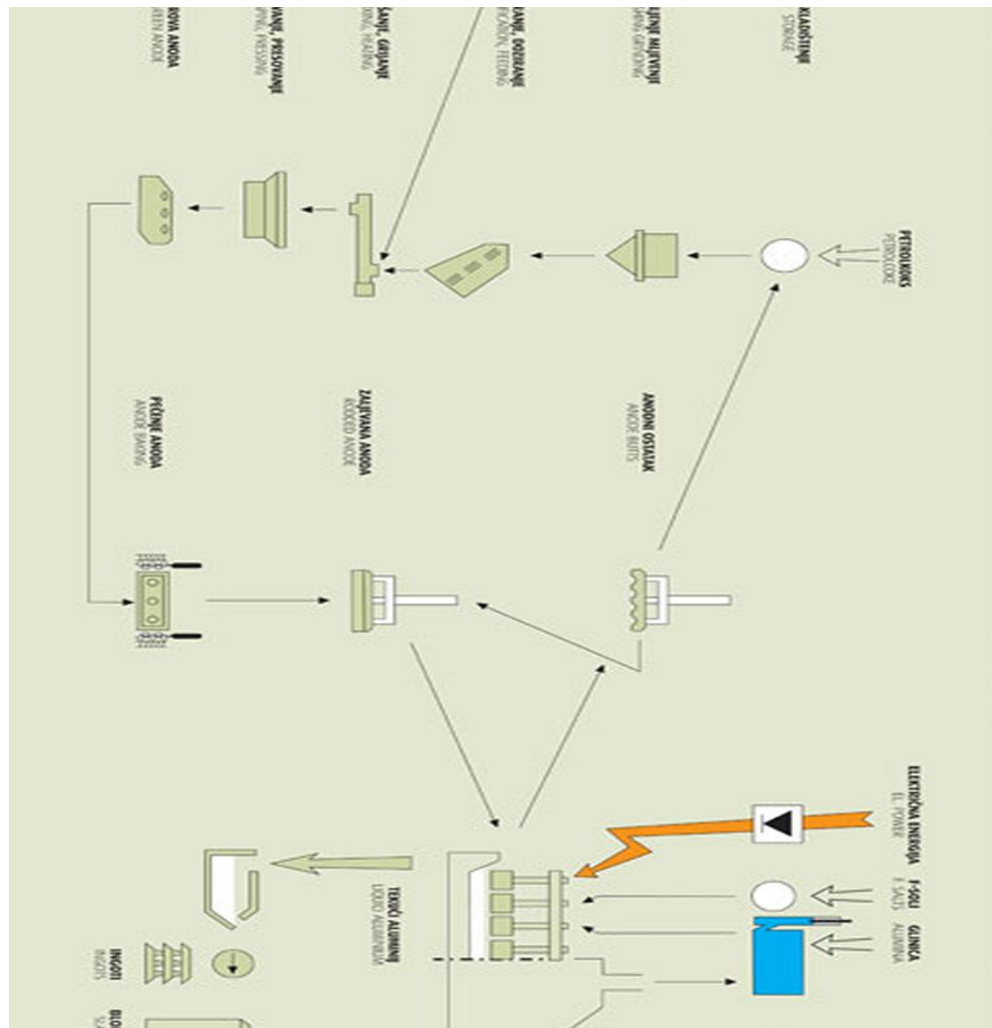
Tablica 1. Fizikalna i mehanička svojstva aluminija [1]

Gustoća	kg/m^3	2700
Talište	$^{\circ}\text{C}$	660
Modul elastičnosti	N/mm^2	69000
Toplinska	$10^{-6}/\text{K}$	23,8
Električna vodljivost	$\text{m}/\Omega\text{mm}^2$	36-37,8
Granica razvlačenja	N/mm^2	20-120
Vlačna čvrstoća	N/mm^2	40-180
Istezljivost	%	4-50

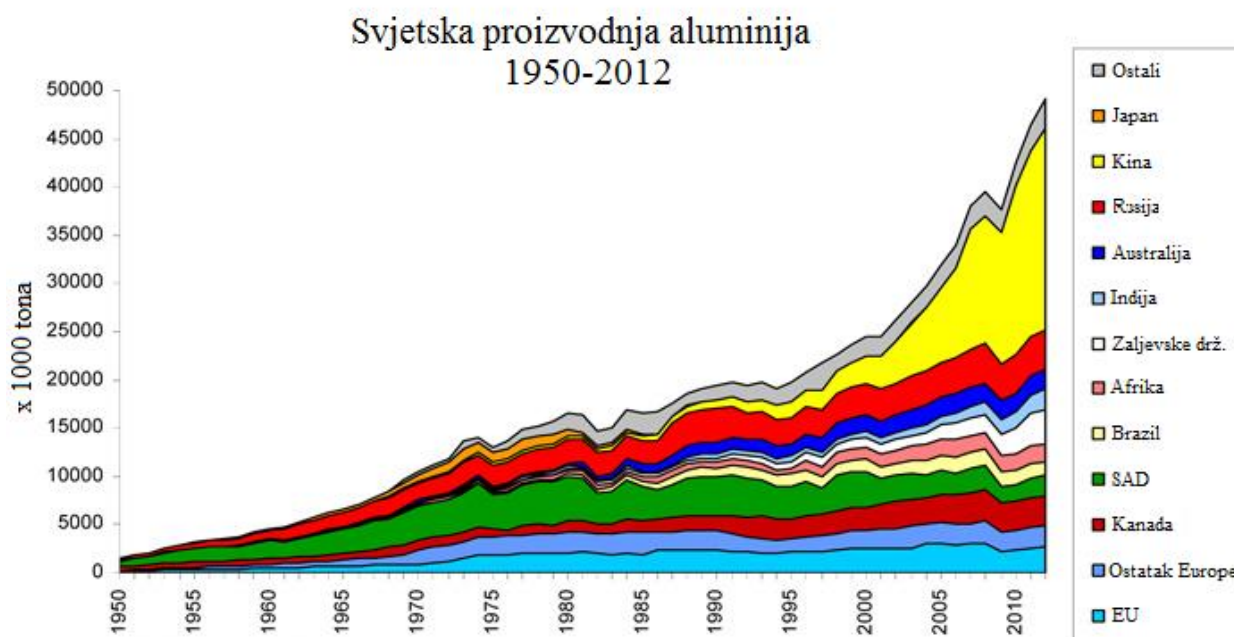
Aluminij je treći element po rasprostranjenosti u zemljinoj kori (7,3%) i tek je 1808. Utvrđeno njegovo postojanje. Nalazi se samo u krutim spojevima s drugim materijalima. Do pojave prvih velikih izvora energije, elektrana, nije mogao biti proizveden u većim količinama, pa je i njegova šira primjena bila nemoguća. Ključni događaji na putu do današnje uporabe su [2]:

- Engleski kemičar Sir Humphrey Davy 1808 ustanovio je postojanje aluminija i dao mu je ime (lat. *alumen*)
- U Njemačkoj 1845 Friedrich Wöhler ustanovio je mnoga aluminijska svojstva
- Godine 1854. Francuz Henry Sainte-Clare Devile razvio je redukcijski proces uporabom natrija koji je omogućio proizvodnju skupog aluminija u ograničenim količinama. Taj proces, koji se kopirao širom Europe, predstavljao je važan korak prema industrijskoj uporabi aluminija. U SAD-u 1885 godine Hamilton Y. Cassner unapređuje Deville-ov postupak i ostvaruje godišnju proizvodnju od 15 tona

- Dva, do tada nepoznata, mlada znanstvenika Paul Heroult i Charles Hall radeći odvojeno, i ne znajući jedan za drugog, godine 1886. istovremeno pronalaze novi elektrolitički proces, koji je i danas temelj za svu proizvodnju aluminija; kada se aluminijski oksid (glinica) otapa u kupki rastaljenog kriolita kroz koju teče istosmjerna struja tada se na dnu kupke taloži aluminij, slika 1.



Slika 1. Shema proizvodnje aluminija [3]



Slika 2. Svjetska proizvodnja aluminija [4]

2.2. Aluminijske legure

Legiranjem nekog osnovnog metale želi se postići bolja svojstva. Aluminijske legure primjenjuju se u lijevanom i gnječenom stanju, pase tako i dijele. Iako je aluminij jako dobar vodič električne struje, kod nekih posebnih legura postignuta su svojstva visoke električne otpornosti. Takve legure se koriste kod motora velikih okretnih momenata [5]. Osim samog legiranja neka svojstva mogu se poboljšati i raznim toplinskim obradama. Nakon takvih obrada, poput precipitacijskog očvršćavanja, pojedine aluminijske legure imaju veću čvrstoću nego konstrukcijski čelici.

Najvažniji legirni elementi su bakar, magnezij, silicij, cink i mangan. Kao dodaci i primjese prisutni su u manjim količinama željezo, krom i titan. Njihovom kombinacijom mogu nastati kompleksnije legure kojima dodatno mogu biti poboljšana kao npr. čvrstoća, tvrdoća, rezna svojstva, livljivost itd.

Legirni elementi utječu na mikrostrukturu što je vidljivo kroz dijagrame stanja. U njima je vidljiv tijek skrućivanja, nastajanje faza i topljivost u čvrstom stanju u ovisnosti o temperaturi i sastavu.

Kao višenamjenski metal aluminij se prvenstveno koristi legiran s drugim elementima. Obično su to višekomponentne legure u kojima je sadržaj drugih elemenata manji, a tvore čvrstu otopinu s aluminijem ili su dispergirani u sitnim česticama. Postoje dvije skupine legura aluminija [6]:

- **ljevačke legure:** radi poboljšanja ljevačkih svojstava, aluminiju se dodaje silicij, ali nekada i u manjim količinama bakar ili magnezij, pojedinačno ili u kombinaciji. Ove legure imaju vrlo dobra mehanička svojstva i lagane su, pa se koriste u izgradnji strojnih dijelova, zrakoplova i svemirskih letjelica. Ovaj rad bazira se isključivo na ljevačkim legurama.
- **gnječive legure:** legure aluminija koje sadrže bakar, magnezij, mangan, ponekad cink i nikal. Pogodne su za izvlačenje, prešanje i kovanje. Posebno su važni duraluminij kod kojih je postupkom brzog hlađenja zamrznuta metastabilna faza čvrste otopine legirajućih elemenata. Time su "zamrznuta" zaostala unutrašnja mikronaprezanja koja daju veliku čvrstoću na makroskopskoj razini.

Osim ove, vrlo važna je podjela aluminijски legura na toplinski obradive i toplinski neobradive.

Glavna razlika između ljevačkih i gnječivih legura je u njihovoj livljivosti. Od gnječivih legura uglavnom se izrađuju predmeti okruglih ili pravokutnih profila smanjene dubine, ali povećanog površinskog otvrdnjavanja. Kod oblika kompliciranije geometrije dolazi, zbog drukčijih zahtjeva, do potrebe za drugim tipom legura. Lomovi prilikom i nakon očvršćavanja te unutarnjeg stezanja materijala donose potrebu za ljevačkim legurama aluminija [7]

2.2.1. Ljevačke legure aluminija

Lijevane legure mogu se svrstati u tri osnovne skupine: Al-Si, Al-Mg i Al-Cu čijom se kombinacijom mogu dobiti legure s poboljšanim nekim od osnovnih svojstava [1].

Ljevačke legure aluminija mogu se lijevati jednako dobro na tri uobičajena načina: gravitacijski u pijesak, gravitacijski u kokilu, te tlačno. Ako je izbor legure dobar, one se

mogu lijevati povoljnije nego ostali metali. Neke od legura aluminija mogu se dodatno očvrsnuti precipitacijom, a neke se mogu i gnječiti, ali su prvenstveno lijevačke legure.

Legure koje nisu namijenjene toplinskom očvršćavanju koriste se za opće namjene gdje su deformabilnost, dobra korozijska postojanost i livljivost taljevine od veće važnosti nego li čvrstoća [6].

U tablici 2. prikazane su lijevačke legure aluminija te njihova svojstva spomenuta u prethodnom tekstu.

Tablica 2. Osnovna svojstva lijevanih aluminijskih legura [1]

Predstavnik		Mehanička otpornost	Livljivost	Rezljivost	Otpornost na koroziju	Tip legure
AlMg3, AlMg5		mala	srednja	dobra	vrlo dobra	Al-Mg
AlSi10Mg, AlSi7Mg1	Mg omogućuje toplinsko očvršćivanje					Al-Si-Mg
AlSi12		mala	vrlo dobra	Slaba	dobra	Al-Si
AlSi5Cu1 AlSi6Cu2	Si negativno utječe na rezljivost, Cu omogućuje smanjenje Si, ali pogoršava otpornost na koroziju					Al-Si-Cu
AlCu4MgTi	Ti i Mg usitnjavaju zrno	Osrednja	slaba	dobra	vrlo slaba	Al-Cu

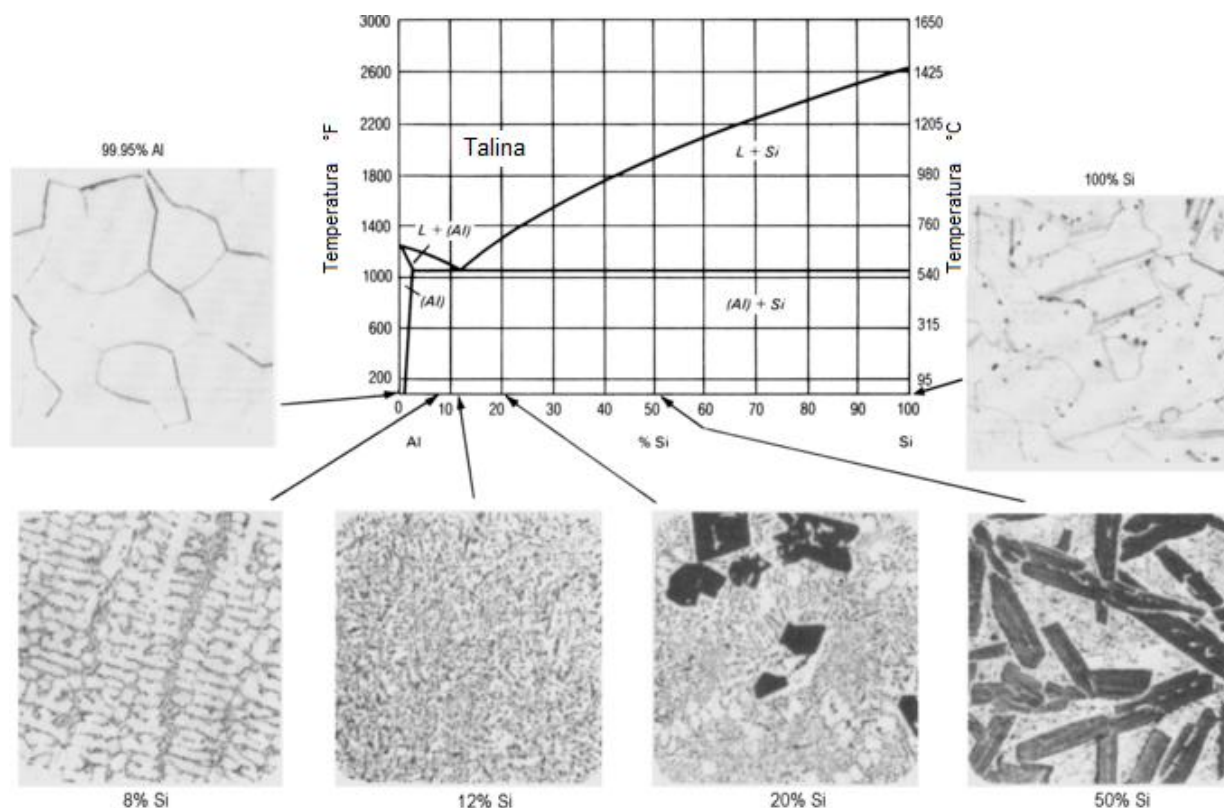
Al-Si legure pokazuju izvanrednu livljivost i otpornost na koroziju. Ova legura je slabe čvrstoću te je slabo mehanički obradiva. Istezljivost, koja kod ove legure može biti izvanredna, posljedica je niske koncentracije nečistoća i mikrostrukturnih svojstava. Te su legure približno eutektičkog sastava što ih čini prikladnima za tlačni lijev budući da je njihov interval skrućivanja uzak. Čvrstoća, duktilnost i livljivost kod nadeutektičkih legura ove taljevine mogu biti dodatno poboljšana [7].

U početku razvoja Al-Si legura bilo je teško napraviti leguru s višim postotkom silicija (od 13%) jer su se izdvajali krupni primarni kristali silicija u obliku pločica ili iglica što je dovelo do velike krutosti legure, zbog čega je njena primjena kao konstrukcijskog materijal bila otežana.

Povećanjem udjela silicija iznad eutektičkog, raste veličina primarnih kristala silicija, vidljivo na slici 3, zbog čega opada čvrstoća i istežljivost. Krupni kristali silicija

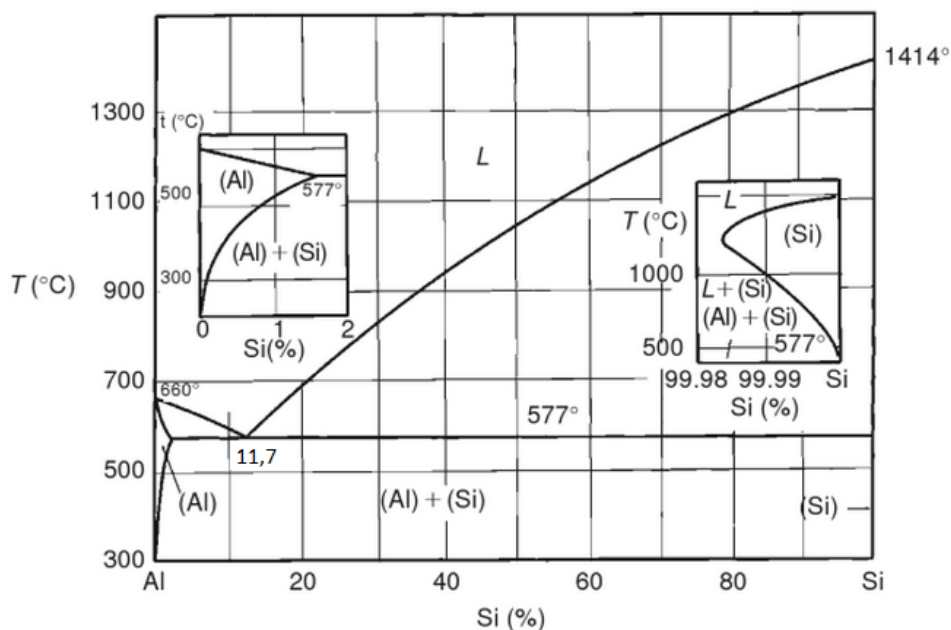
otežavaju mehaničku obradu rezanjem, a umanjuju i otpornost na koroziju, ali povećavaju otpornost trošenju

Kako bi ipak izbjegli nastanak primarnih kristala silicija mora se postići eutektička struktura pri većim udjelima legirnog elementa silicija. To se može postići dodavanjem male količine natrija (manje od 0,1% mase šarže) u obliku soli. Na taj način se odgađa nukleacija kada se dostigne potrebna eutektička temperatura.



Slika 3. Dijagram stanja Al –Si s prikazom mikrostrukture [8]

Silicij je osnovni element koji doprinosi dobroj livljivosti aluminijevih legura, te ih to čini najrasprostranjenijima u grupi ljevanih legura, posebno one s 10% do 13% Si i rijetko s malom količinom bakra [1].



Slika 4. Dijagram stanja Al-Si [9]

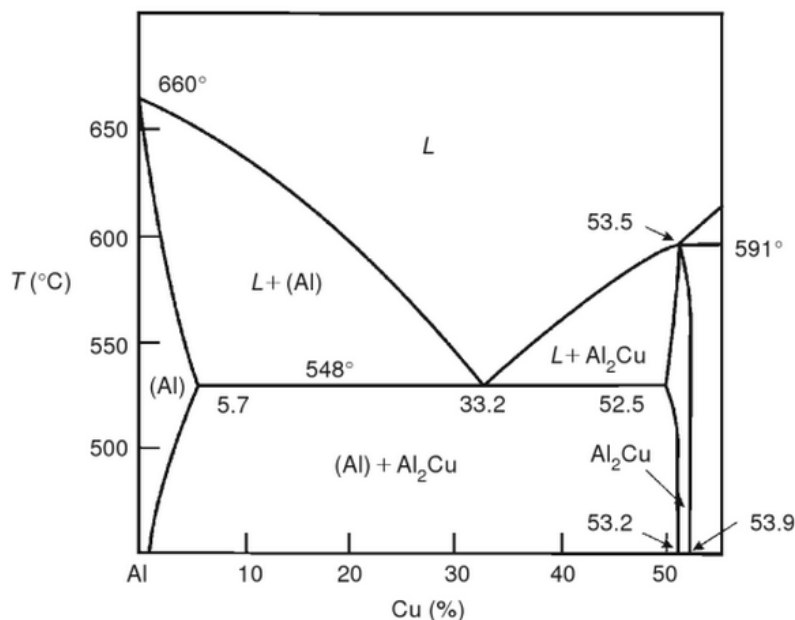
Dijagram stanja aluminij-silicij, a prikazan na slici 3. je eutektičkog tipa s eutektikom pri 11,7% Si i temperaturi 577°C. Pri toj se temperaturi u kristalima mješancima aluminija (α) otapa 1,65% Si, a pri temperaturi 300°C još samo 0,07% Si. Primjenom polužnog pravila izlazi da se eutektik sastoji od oko 90% kristala mješanaca aluminija, a ostatak je čisti silicij [1].

Al-Cu legure se u velikoj mjeri koriste kao lijevane, ali i kako gnječene. Ove legure pružaju visoku čvrstoću i tvrdoću pri povišenim temperaturama. Ove značajne aluminijske legure mogu sadržavati bakra i do 10%. Ove legure i bez toplinske obrade pokazuju značajno poboljšanje svojstava poput tvrdoće i čvrstoće ali srednjom ili slabom otpornosti na udarce [7]. Ove legure su znatno slabije livljivosti, a pri skrućivanju su sklone pogrubljanju zrna radi čega im se često dodaju magnezij (do 0,3%) ili titan (do 0,2%). Podnose radne temperature do 300°C [1].

Aluminijske legure koje sadržavaju bakar su znatno manje otporne na koroziju, stoga neki proizvodi mogu biti podložni napetosnoj koroziji [7].

Dijagram stanja aluminij-bakar (slika 5) pokazuje nastajanje intermetalnog spoja Al_2Cu kod 54% Cu. Intermetalni spojevi su tvrdi i krhki te tako nepoželjni u tehničkim legurama. U Svim legurama sa više od 5,7 % Cu mora se računati sa računati s

prisutnošću te faze, najmanje kao dio eutektičkog skrućivanja preostale taljevine. Nastoji se izbjeći primarne kristale Al_2Cu . Tehničke legure sadrže zbog širokog intervala skrućivanja oko 4,5% Cu pri eutektičkoj temperaturi. Topljivost se smanjuje sniženjem temperature na svega 0,45% Cu pri 300°C . Višak bakra precipitira u obliku intermetalnog spoja Al_2Cu [1].



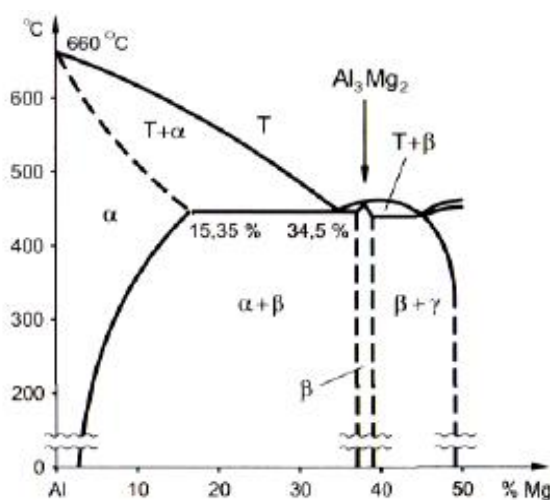
Slika 5. Dijagram stanja Al-Cu [9]

Al-Si-Cu legure su legure kojima je dodan bakar radi poboljšanja čvrstoće i istezanja, uz cijenu gubitka livljivosti i otpornosti na koroziju smanjenjem sadržaja silicija i povećanjem sadržaja bakra. Čvrstoća i tvrdoća mogu se dalje povećavati precipitacijom. Precipitacijskim očvrnućem legure postižu i do $R_{p0.2}$ i do 200 N/mm^2 [1]. Dodatkom titana postiže se sitnozrnata mikrostruktura i zato ove legure imaju dobru žilavost, otporne su na udarce i dobro su obradive odvajanjem čestica [6].

Al-Mg legure su izrazito otporne na koroziju što im je i glavno svojstvo, uzimajući u obzir otpornost na morsku vodu i atmosferu oko nje. Al-Mg legure su izrazito zavarljive te kao takve nalaze primjenu u arhitekturi. Legure su dobro strojno obradive, te imaju dobre vizualne karakteristike. Najbolji omjer čvrstoće i žilavosti ima legura sa oko 10% Mg [1].

Legure s magnezijem su sklonije oksidaciji. U rastaljenom stanju oksidi aluminija i magnezija mogu znatno utjecati na kvalitetu odljevka. Ove legure su jedne od najteže livljivih legura zbog pojave poroznosti i stvaranja troske.

Dijagram stanja Al-Mg (slika 6) pokazuje da aluminij i magnezij tvore intermetalni spoj Al_3Mg_2 (β) kod 37,5% Mg. Ta je faza u legurama aluminija s magnezijem nepovoljna iz dva razloga. Vrlo je tvrda i zato slabo oblikovljiva deformiranjem, a kod djelovanja korozivnog medija prelazi prva u otopinu zbog visokog udjela magnezija. Eutektičke legure sa 34,5 % Mg imaju vrlo nisku temperaturu skrućivanja od 451°C. Nisu uporabljive kao lijevane legure jer eutektik sadrži gotovo 80% tvrde faze Al_3Mg_2 . Teorijski Al-Mg legure su uporabljive do 15% Mg, a u teoriji još i manje [1].



Slika 6. Dijagram stanja Al-Mg [1]

Al-Si-Mg legure eutektičke su i precipitacijski očvrstljive uz dodatak od 0,2% do 0,5% Mg. Ta toplinska obrada jest prvi puta primijenjena baš kod aluminijskih legura. Sastoji se od homogenizacijskog žarenja i naknadnog dozrijevanja. Na taj se način izlučuju precipitati koji znatno povišuju čvrstoću. Dodatkom magnezija u leguru aluminija i silicija stvara se osnova za grupu važnih i korisnih legura koje objedinjuju izuzetnu livljivost i odlična mehanička svojstva poslije toplinske obrade. Korozijska otpornost je također dobra [7]. Imaju uzak temperaturni interval skrućivanja (do 30°C) i malo linearno skupljanje (1%). Kod lijevanja u pijesak moraju se obavezno cijepiti. Pješčani odljevci mogu se zavarivati, kokilni samo ograničeno, a tlačni nikako zbog većeg sadržaja plinova. Radna temperatura može biti i do 200°C [1].

2.2.2. Gnječive legure

Osnovna podjela gnječenih aluminijskih legura temelji se na kemijskom sastavu i mogućnosti precipitacijskom očvršćavanju. Jedna i druga podjela mogu se obuhvatiti odjednom. Od legura koje očvršćuju hladnim deformiranjem zahtjeva se dovoljna čvrstoća i krutost u hladnom stanju kao i dobra korozijska postojanost (tablica 3). Većina ovih legura ima mikrostrukturu koja se potpuno sastoji od čvrste otopine. To je dodatni faktor u prilog njihovoj velikoj duktilnosti i velikoj korozijskoj postojanosti. Željena mehanička svojstva postižu se stupnjem ugnječenja primijenjenim u zadnjoj fazi hladnog oblikovanja deformiranjem, pa se legure obično isporučuju u mekom stanju ili nakon određenog stupnja hladnog ugnječenja.

Tablica 3. Podjela i osnovne značajke gnječenih aluminijskih legura [1]

Vrste legure	Način očvršćuća	R_m N/mm ²
Al-Mn	Deformiranjem u hladnom stanju	200-350
Al-Mg		
Al-Mg-Mn		
Al-Mg-Si	precipitacijom	330
Al-Cu-Mg	precipitacijom	450
Al-Zn-Mg	precipitacijom	400
Al-Zn-Mg-Cu	precipitacijom	550
Al-Li-Cu-Mg	precipitacijom	500

2.3. Recikliranje aluminija-sekundarni aluminij

Danas smo u vremenu kada treba racionalnije trošiti energiju i materijale čiji su izvori ograničeni, stoga je recikliranje aluminija danas vrlo zastupljeno, najviše među metalima. Jedan od najznačajnijih čimbenika u recikliranju aluminija je činjenica da je za pretaljivanje potrebno samo 5% energije od one potrebne za proizvodnju primarnog proizvoda. Drugi važan čimbenik je da se većina upotrijebljenog aluminija može reciklirati, što ga čini krajnje dragocjenim.

Sekundarni aluminij koristi se kao sirovina već duže vrijeme, a to je aluminij koji je dobiven recikliranjem otpadnog aluminija. Komponente otpada, kao što su limenke za napitke, glave cilindara osobnih automobila, okviri prozora demoliranih zgrada i stari električni vodiči recikliraju se pomoću sredstava za rafinaciju sekundarnog aluminija[6].

Sekundarni aluminij pretežno se koristi za izradu odljevaka. Sekundarni aluminij je nepovoljniji od primarnoga jedino u slučajevima kada se od materijal prvenstveno očekuje [1]:

- dobra električna vodljivost
- antikorozivnost

Zbog onečišćena sekundarnog materijala ne mogu se postići ova svojstva jer se temelje ponajprije na minimalnom masenom udjelu nečistoća [1].

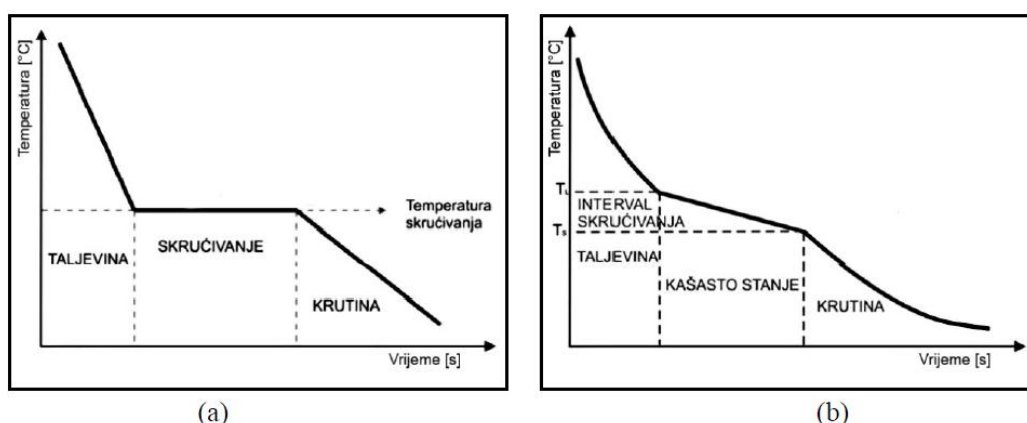
3. SKRUĆIVANJE METALA I LEGURA

3.1. Nukleacija i kristalizacija

Skrućivanje, odnosno kristalizacija, označava fazu prijelaza iz rastaljenog u kruto stanje. Većinu kristaličnih metala i legura dobiva se procesom skrućivanja iz taline. U tekućoj fazi najlakše se provodi miješanje komponenta-legiranje metala, a postupkom lijevanja dobiveni materijal oblikujemo u željenu formu. Ovisno o uvjetima pod kojima se odvija nastala krutina će imati određenu strukturu, mehanička i fizikalna svojstva. Do skrućivanja dolazi kada se iz sustava odvodi toplina koja rezultira pothlađivanjem taljevine te nastankom prvih klica (nukleusa).

Hlađenjem taline, uslijed kontinuiranog odvođenja topline i snižavanja temperature, postepeno se smanjuje iznos vibracija atoma do jedne određene temperature skrućivanja, odnosno taljenja. Pri skrućivanju atomi se slažu u pravilan periodički, trodimenzionalni raspored, koji karakterizira kristalna rešetka.

Prijelaz iz tekućeg u kruto stanje odnosno kristalizacija, popraćen je oslobađanjem latentne topline skrućivanja. Latentna toplina skrućivanja je količina topline koja se oslobodi kada tvar, odnosno taljevina promjeni svoje agregatno stanje iz kapljevitog u kruto, pri konstantnoj temperaturi (slika 7). Brzina skrućivanja proporcionalna je brzini odvođenja topline [6].



Slika 7. a) Prikaz krivulje hlađenja za čisti metal, b) Prikaz krivulje hlađenja binarne legure

3.1.1. *Nukleacija*

Nukleacija je nastanak neke nove faze u taljevini, odnosno proces nastajanja klica. Skrućivanje započinje nukleacijom, a dalje se nastavlja rastom kristala u taljevini i stvaranjem kristalnih zrna. Postoje tri vrste nukleacije

- **homogena nukleacija** prisutna je kod izrazito čistih metala i nužno je veliko pothlađivanje taljevine, te se u praksi rijetko pojavljuje. Ovo je najteži put stvaranja klica i kristala jer je potrebno prevladati energetske barijere (energiju granične površine klica). Za prevladavanje te energetske barijere potrebno je veliko pothlađenje.
- **heterogena nukleacija** se odvija u realnim uvjetima pri skrućivanju metala i legura uz vrlo malo pothlađenje
- **dinamička nukleacija** poseban je primjer heterogene nukleacije koja je uvjetovana mehaničkim uvjetima (kavitacijom)

3.1.2. *Kristalizacija*

Skrućivanjem metala u kalupu nastaju različite mikrostrukture, što utječe na svojstva odljevka. Mikrostruktura nakon skrućivanja može biti u obliku [6]:

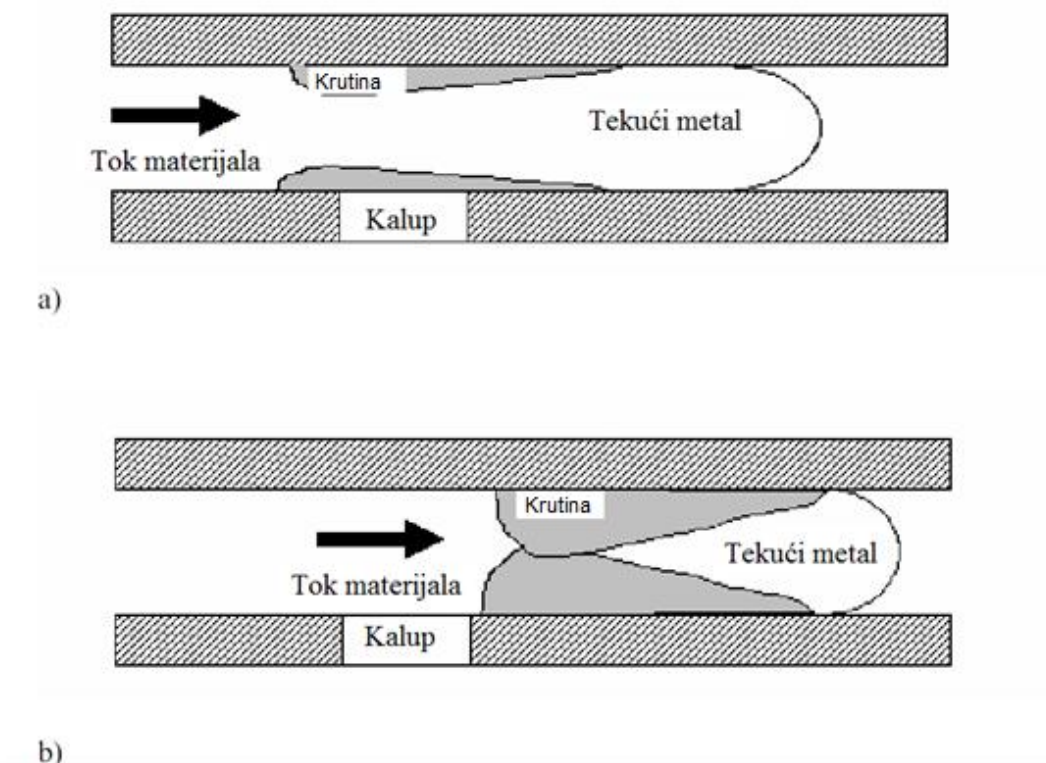
- jednofaznih primarnih kristala (čisti metali, ali se javljaju i u legurama)
- višefazna struktura (kod legura)

Kod legura primarni kristali se javljaju u obliku dendrita, dok se višefazne strukture javljaju u obliku eutektika. Dendriti i eutektici zasebno ili u kombinaciji čine zrna.

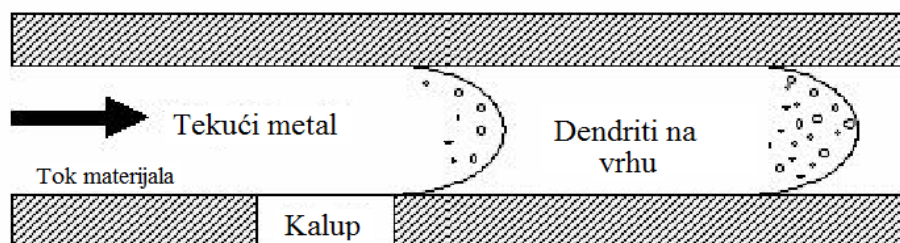
Način skrućivanje unutar kanala, kod ispitivanja livljivosti, ukazuju na značajniju razliku između čistih metala i legura. Kada čisti metal ili legura eutektičkog sastava uđe unutar kanala kojeg treba ispuniti, skrućivanje počinje na stijenkama te se nastavlja rastom stupićastih zrna kako metal prolazi kroz kanal. Kada se skrutnuti, stupoliki, kristali spoje kao što je vidljivo sa slike 8. protok novog tekućeg materijala će prestati [10].

Za razliku od čistih metala i eutektičkih legura, protok ostalih legura se zaustavlja od početka toka taline, jer se tamo javljaju prvi kristali, vidljivo na slici 8. Povećanjem koncentracije otopljenog materijala mijenja se i način skrućivanja taljevine. Tako umjesto stupićastih zrna nastaju formiraju se stupićasti ili pak istoosni dendriti. Nastali dendriti

teku zajedno s tokom tekućeg materijala, te rastu dok se ne dostigne kritično trenje a tok materijal zaustavi. Prvo se zaustavlja vrh toka, a zatim poput čepa sprječava daljnje tečenje taline.

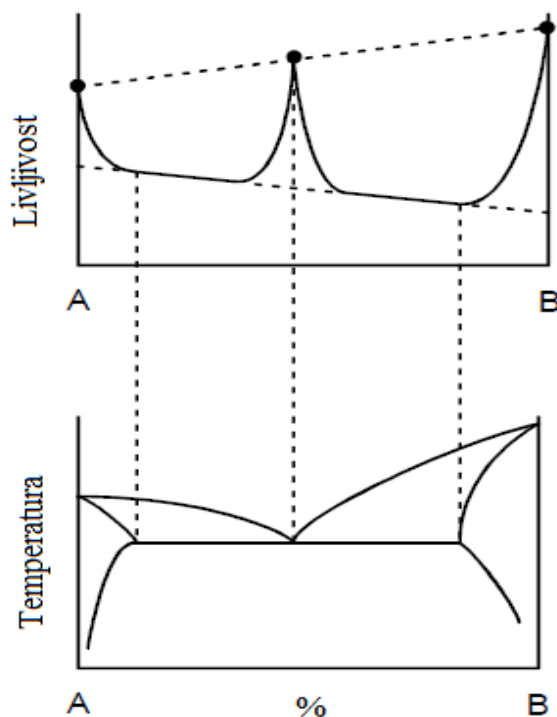


Slika 8. Skupljanje stupolikih kristala: a) početna faza, b) zatvaranje prolaza taljevini [10]



Slika 9. Stvaranje prvih dendrita u talini

Čisti metal i eutektičke legure su zbog načina skrućivanja taljevine ukupno gledano bolje livljivi što je vidljivo i na mapi livljivosti binarne legure, slika 10.

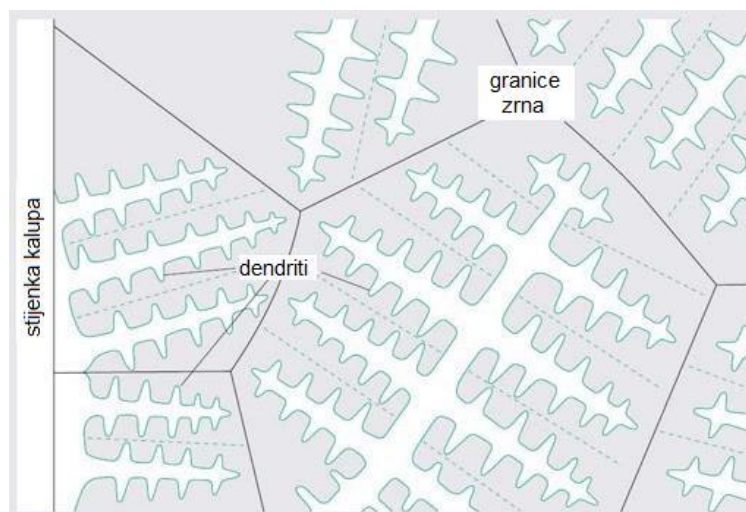


Slika 10. Mapa livljivosti binarnih legura [14]

3.1.3. Razvoj dendrita i dendritne strukture

Kod lijevanja metala nastaju specifične mikrostrukture. Kada se metal u rastaljenom stanju počne skrućivati zrna, kristali, se počinju fomirati, kako na stijenkama kalupa tako i rasuti po talini. Dendriti su dobili naziv prema grčkoj riječ *dendron* što znači drvo [17]. Nastanak dendrita može značajno utjecati na svojstva materijala. Metalurgija je dosta zainteresirana za što boljim razumjevanjem kontrole nastajanja dendrita, a pogotovo za njihov nastanak kod aluminija.

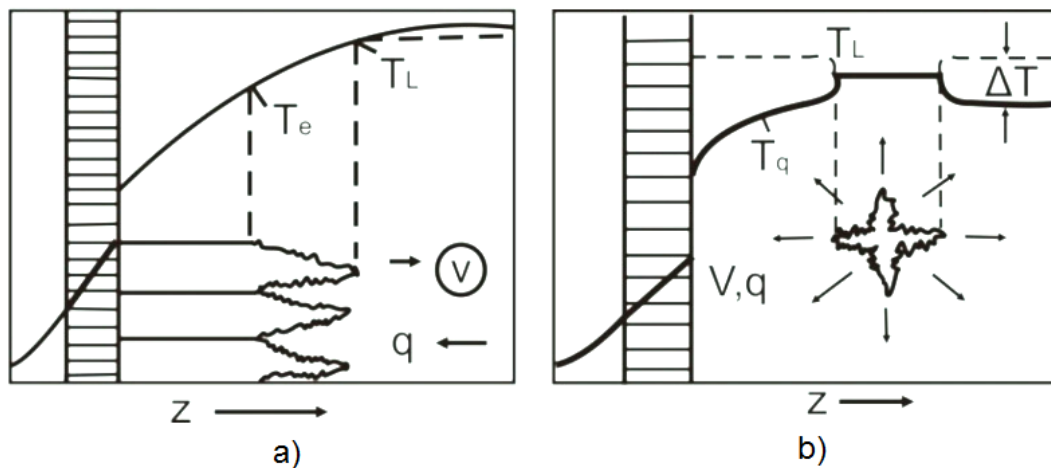
Dendriti su vrlo česti kod skrućivanja legura. Veličina i oblik dendrita koji prvi nastanu prilikom skrućivanja materijala obično imaju velik utjecaj na svojstva, pa čak i nakon dodatne obrade. Dendriti koji sporo rastu, ali zato se jako granaju. Isto tako ako se talina jako brzo hladi dendriti brže rastu, a dobiju se finije grane. Shematski prikaz grananja dendrita vidljiv je na slici 11.



Slika 11. Shematski prikaz dendrita [17]

Nastanak prvih izbočina na fronti skrućivanja mora biti uvjetovan pothlađenjem taljevine, da se dobije uvjet za nastanak dendrita. Takvo pothlađenje se još naziva i konstitucijsko pothlađenje te je ono prekretačka snaga za stvaranje stabilne izbočine, a kasnije i kristala [6]. Kako takva kugličasta izbočina raste u pothlađenoj taljevini ona postaje nestabilna te se njena građa destabilizira. Nastali čvrsti oblici u takvoj situaciji počinju izražavati smjerove daljnjeg rasta kristala. Na smjerove rasta je utjecano i anizotropijom koju pospješuje površinski prijenos energije s taljevine na krutninu [18].

Na slici 12 nalazi se shematski prikaz stupačastog skrućivanja koje počinje od stijenke kalupa, dok se toplina q odvodi u suprotnom smjeru od smjera rasta dendrita (slika 12a). Istoosno skrućivanje u centru kalupa, gdje se toplina q odvodi u taljevinu i paralelna je rastu dendrita, nalazi se na slici 12b [6].



Slika 12. Stvaranje stupičastog i istoosnog dendrita

3.1.4. Razvoj eutektičke mikrostrukture

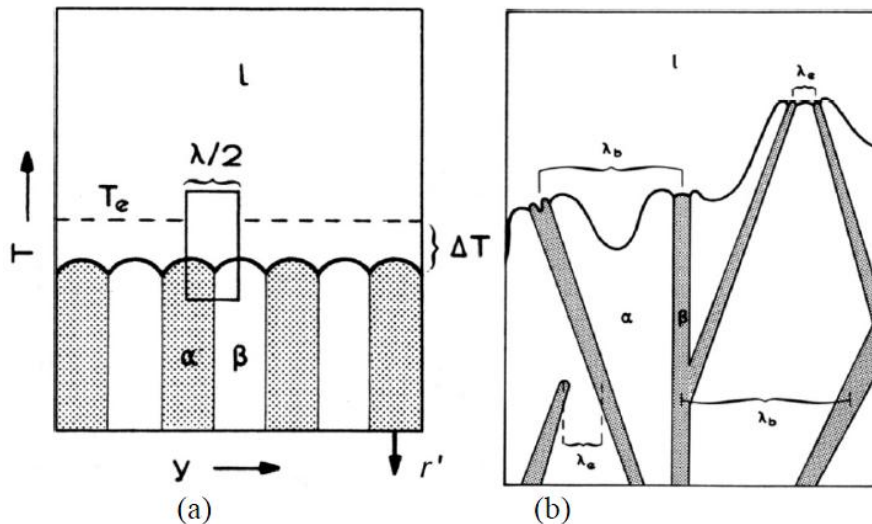
Eutektičko skrućivanje je od posebnog interesa jer se na taj način skrućuju Al-Si legure. Proces eutektičkog skrućivanja sastoji se od:

- stvaranja klica iz dijela taljevine eutektičkog sastava, te razvitka kristala na tim klicama koji dalje rastu
- eutektičko skrućivanje započinje na mjestu dodira dva primarna rastuća kristala
- izlučivanja jedne od krutih faza na granici taljevina/kristal, a potom druge krute faze

Eutektik je smjesa sastavljena od dvije ili više faza koje imaju niže talište od svake čiste komponente. Eutektička točka je najniža temperatura na kojoj eutektička faza može postojati u tekućem stanju i u njoj je sastav taljevine i krute faze jednak. Eutektike možemo klasificirati na sljedeći način [6]:

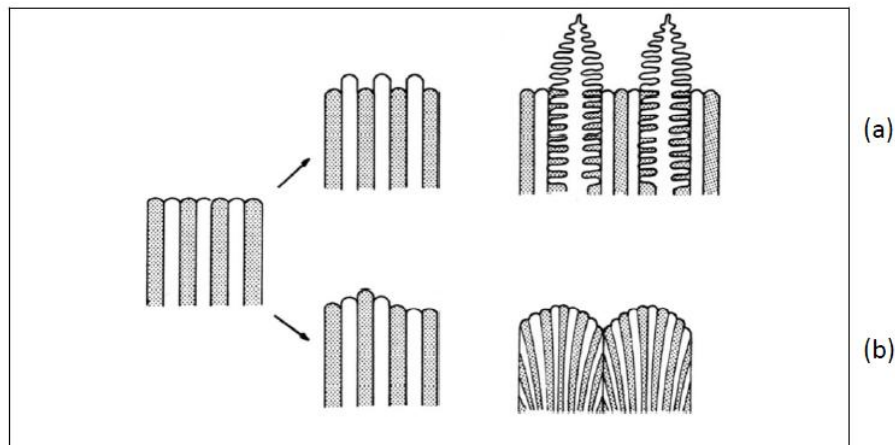
- pravilni eutektici (nefasetirani eutektici): Pravilna morfologija ovih eutektika proizlazi iz činjenice da su obje faze nefasetirane, odnosno granična površina kruto/tekuće u atomskom mjerilu je hrapava. Lamelle obju faza (α i β) tijekom skrućivanja rastu u smjeru odvođenja topline i okomite su na graničnu površinu kruto/tekuće. Utjecaj na pravilnu eutektičku strukturu ima difuzija otopljenog elementa (nastoji smanjiti razmak) i kapilarnost (nastoji povećati razmak između lamela).

- nepravilni i kompleksni pravilni eutektici (nefasetirani eutektici): nepravilna morfologija ovih eutektika uzrokovana je rastom fasetirane faze, koja ima glatku graničnu površinu kruto/tekuće, u smjeru koji je određen specifičnom orijentacijom slaganja atoma, tako da dolazi do niza različitih lamelarnih razmaka. Ako dvije lamele konvergiraju jedna od njih prestaje rasti, a lamele koje divergiraju kada dosegnu kritični lamelarni razmak prestaju rasti.



Slika 13. Shematski prikaz: (a) Morfologije pravilnog lamelnog dvofaznog eutektika koji raste u jednom smjeru u pozitivnom temperaturnom gradijentu ; (b) Rast nepravilnog eutektika: grananja fasetirane faze kod λ_b , zaustavljanja kod λ_e | odgovarajući oblik granične površine kruto/tekuće [6]

Osim ovih tipova eutektika u strukturi se mogu pojaviti i dendriti pa takvu pojavu nazivamo konkurentni rast dendrita i eutektika. Do te pojave dolazi kod višekomponentnih tehničkih legura kod kojih mogu biti prisutni brojni legirni elementi koji tada mijenjaju morfologiju [6].



Slika 14. Shematski prikaz tipova nestabilnosti planarne eutektičke granične površine kruto-tekuće: (a) nestabilnost jedne faze rezultira nastajanjem dendrita jedne faze i interdendritnog eutektika; (b) nestabilnost dviju faza rezultira nastajanjem eutektičkih ćelija ili kolonija u prisustvu trećeg legirajućeg elementa [6]

4. LIVLJIVOST ALUMINIJSKIH LEGURA

Ne postoji sveobuhvatna i precizna definicija livljivosti. Livljivost je karakteristika nekog materijala da popuni kalup prije nego se skrutne. Livljivost se može još definirati i kao sposobnost metala, odnosno legure da se izliju u traženom obliku određenim postupkom bez pojave pogrešaka unutar i na odljevku. Pogreške mogu biti pukotine, pore, segregacije, uključci i drugi unutarnji i vanjski poremećaji koji pogoršavaju svojstva i izgled odljevaka. Livljivost legura aluminija ima značajnu ulogu pri proizvodnji kvalitetnih, tankostjenih odljevaka, odljevaka manje mase, te odljevaka kompliciranih oblika [6].

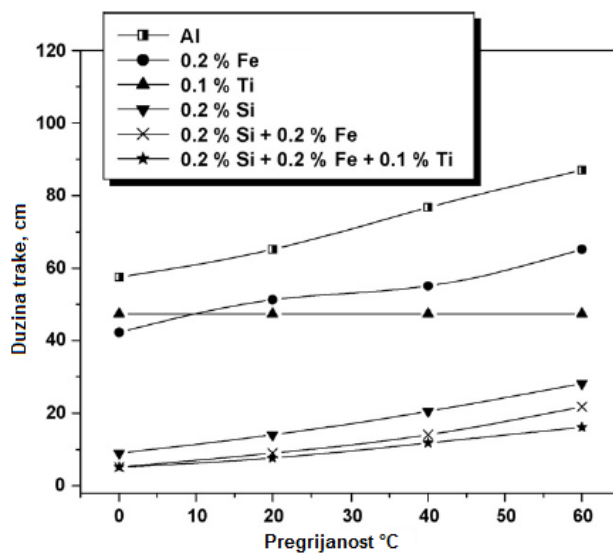
Livljivost ovisi o mnogim čimbenicima, a nadalje u ovom odlomku su sažete one najbitnije. Ti čimbenici su kemijski sastav legure, temperatura pregrijavanja, viskoznost, materijal kalupa, površinska napetost i oksidni film,

4.1. Utjecaj sastava na livljivost legure

Kemijski sastav je jedan od najvažnijih čimbenika koji utječe na livljivost. Promjenom sastava se mogu mijenjati viskoznost, površinska napetost, te sam način skrućivanja taljevine. Radi poboljšanja ljevačkih svojstava aluminiju se dodaje silicij, bakar ili magnezij, pojedinačno ili u kombinaciji. Utjecaj tih legiranih elemenata je veći kada se dodaju u većim količinama, dok dodatak manjih količina legirajućih elemenata ima manji utjecaj. Ovisno o vrsti legure i njezinom kemijskom sastavu pojedini elementi mogu imati različit utjecaj na livljivost, što se vidi iz rezultata istraživanja spomenutih u ovom poglavlju.

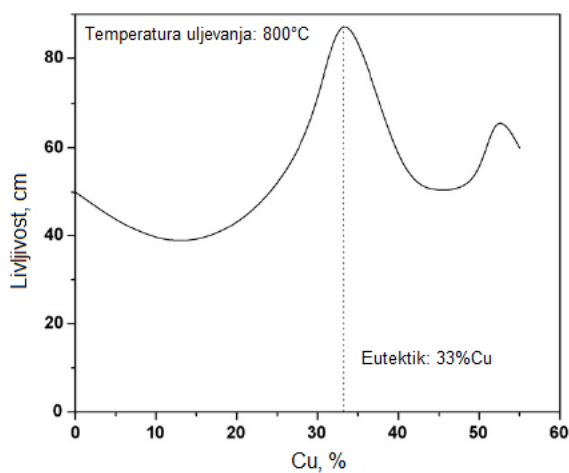
Najveću livljivost pokazuju Al-Si legure sa sadržajem silicija iznad 15% (nadeutektičke legure), dok je ona najmanja (na temperaturi ulijevanja 800°C) pri masenom udjelu silicija od 5 do 6%. Razlog tome nalazi se u visokoj temperaturi taljenja odnosno utjecaju visoke latentne topline primarnog silicija. Livljivost čistog aluminija naglo opada s opadanjem njegove čistoće (već pri dodatku od 1,65% silicija), velika razlika je uočena kod livljivosti između čistog aluminija i aluminijske legure s malo silicija (slika 14) [11]. Silicij utječe na način skrućivanja znatno se ne mijenja do sadržaja silicija od 7-8%,

kada počinje ponovno rasti i svoj maksimum dostiže kod nadeutektičke kompozicije pri sadržaju silicija iznad 15% (17-18%), nakon čega dolazi do ponovnog opadanja.

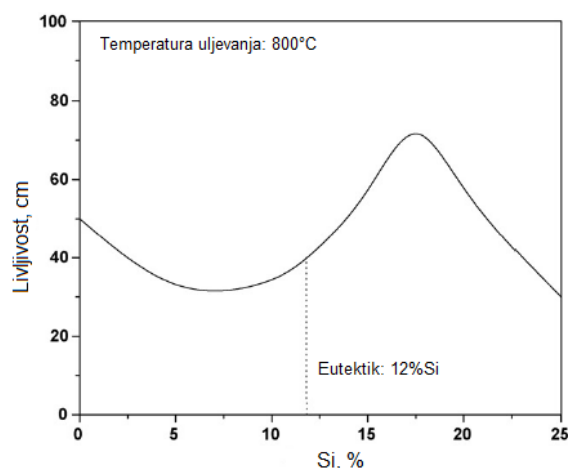


Slika 15. Utjecaj temperature i nečistoća na livljivost [11]

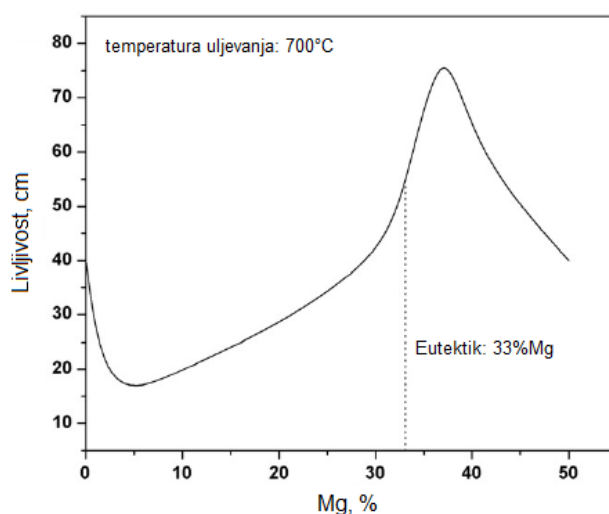
Na slikama 16,17 i 18 prikazani su rezultati spiralnog testa livljivosti za binarne legure Al-Cu, Al-Si, Si-Mg.



Slika 16. Krivulja livljivosti ovisno o sastavu Al-Cu legure [11]



Slika 17. Krivulja livljivosti ovisno o sastavu Al-Si legure [11]

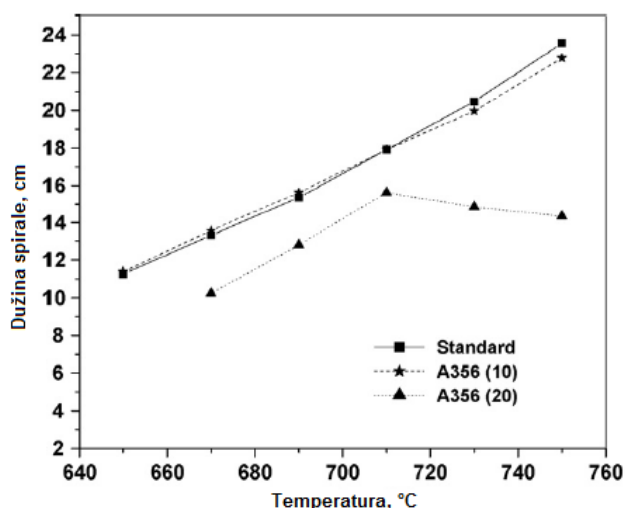


Slika 18. Krivulja livljivosti ovisno o sastavu Al-Mg legure [11]

4.2. Utjecaj temperature uljevanja na livljivost

Pored kemijskog sastava i temperatura lijevanja odnosno pregrijavanje ima vrlo važan utjecaj na livljivost taljevine. Povećavanjem temperature lijevanja povećava se i livljivost, tako bar govore relevantna ispitivanja. Tako je naprimjer Kolsgaard pronašao (*A. Kolsgaard, Ph.D. Thesis, NTNU University of Science and Technology, 1993.*), mjerenjem spiralnim testom, kako livljivost raste proporcionalno s pregrijavanjem. Povećanjem temperature taljevine za 1°C postiže se povećanje od 1% u dužini tečenja

taljevine u temperaturnom intervalu od 700-760°C. Sahoo i Sivaramakrishnan dolaze do saznanja (*K.L. Sahoo, C.S. Sivaramakrishnan, J. Mater. Process. Technol. 135 (2003) 253–257.*), mjerenjem pomoću legure sastava Al–8.3Fe–0.8V–0.9Si i standardnog spiralnog testa, da se povećava livljivost za 0,4% za 1°C u temperaturnom intervalu od 860-900°C. Na slici 19 prikazan je utjecaj temperature ulijevanja na livljivost za aluminijske legure oznake A356 (6,5-7,5% Si)



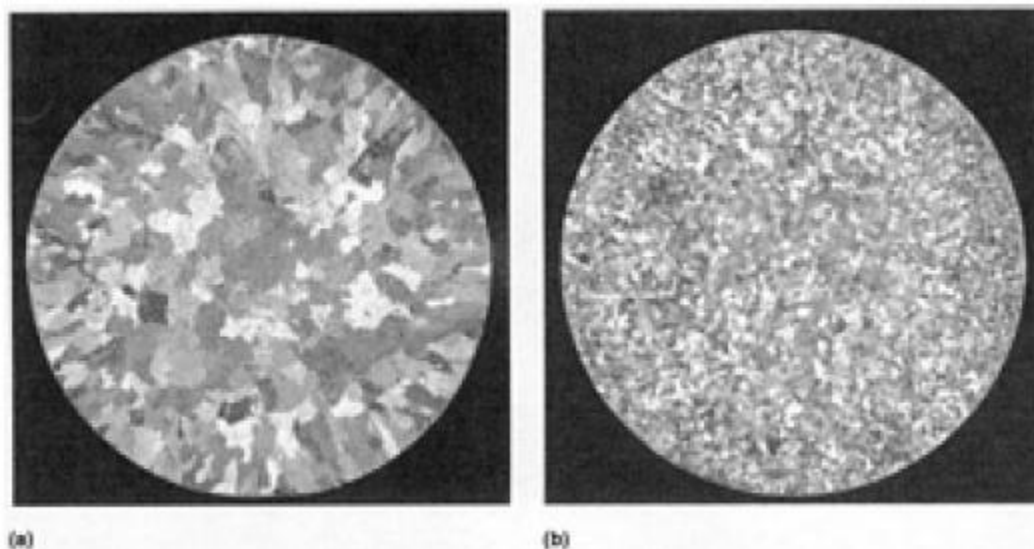
Slika 19. Utjecaj temperature ulijevanja na livljivost [11]

4.3. Utjecaj na livljivost usitnjavanjem zrna

Prednosti učinkovitog smanjenja zrna su [20]:

- bolje napajanje odljevka
- bolja otpornost na habanje
- bolja mehanička svojstva
- bolja reakcija na toplinsku obradu

Postupak obrade taljevine usitnjavanjem zrna uobičajen je u industrijskoj proizvodnji. Tako se poboljšavaju mehanička svojstva odljevaka poput granice razvlačenja, žilavosti i otpornosti na vruće pukotine, bolja je završna površina i strojna obradivost, smanjuje se količina škarta, te se ujednačava raspodjela sekundarnih faza i mikroporoznost. Usitnjavanjem zrna grubozrnata struktura pretvara se u sitnozrnatu, istoosnu strukturu kao što se može vidjeti na slici 20.



Slika 20. Učinak usitnjavanja zrna ingota: a) neusitnjeno zrno, b) usitnjeno zrno [20]

Najčešće korištena sredstva za usitnjavanje zrna su ternarne legure na bazi titana i bora, a u novije vrijeme i ugljika. Koriste se i drugi elementi, ali oni nisu dovoljno učinkoviti. Najučinkovitijima su se pokazale ternarne Al-Ti-B i Al-Ti-C predlegure. One dolaze u obliku žica, ploča, šipki, saća i tableta [6].

Mollard je primijetio smanjenje livljivosti, vakuumskim testom, kod se slitini sastava Al-4,5%Cu dodao 0,15%Ti (*R.Mollard, MS Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 1960.*). Tiryakioglu u svom istraživanju nije pronašao utjecaj usitnjavanja zrna na livljivost dodajući 0,04%Ti leguri A356. Dahle je došao do mnogo složenijeg odgovora na livljivost kada je lijevao spiralnu probu s materijalom A356 kojem je dodao predleguru AlTi5B1. Kada je zrno usitnjeno s manje od 0,12% Ti livljivost je padala, a s više od 0,12% Ti je rasla (*A.K.Dahle, P.A. Tondal, J.J. Paradies, L. Arnberg, Met. Mater. Trans. A27 (1996) 2305–2313*) [10].

Ukupno rješenje kod ovog utjecaj na Al legure je izrazito složen jer ovisi o mnogim faktorima poput:

- količina i vrsta dodatka za usitnjavanje zrna,
- sastav legure,
- vrijeme i temperatura držanja u peći.

4.4. Utjecaj kalupnog materijala na livljivost

Provođenjem testa u vakuumu došlo se do zaključka da je livljivost kod kanala od nehrđajućih čelika veća nego kod kanala od kvarca. Fleming je u svojim ispitivanjima primjetio da kalupni materijal značajno utječe na livljivost. Pokazalo se da je livljivost bolja kod grubljeg nego finog pijeska. Kada je u pitanju postizanje bolje livljivosti pokazalo se da je kvarcni pijesak bolji od cirkonskog (ukoliko se u oba slučaj koristi bentonit kao vezivo) [10]. Livljivost kod kalupa od svježe kalupne mješavine ne ovisi s promjeni veličine zrna, sadržajem vlage ili manjih dodataka kalupnom pijesku, poput škroba ili piljevine.

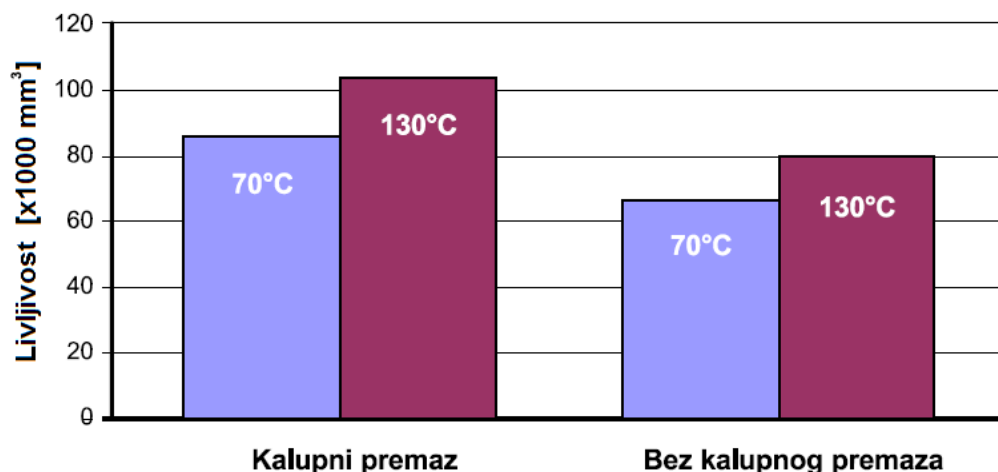
4.5. Utjecaj kalupnog premaza na livljivost

Kalupni premaz je koristan kako bi se produžio vijek kalupa te kako bi se olakšalo vađenje odljevka. Kalupni premaz također ima ulogu u povećanju livljivosti zato što smanjuje koeficijent prijelaza topline između odljevka i materijala kalupa. Tako rastaljeni materijal duže zadržava svoju toplinu [6].

Također premazi se upotrebljavaju za dobivanje boljih površina odljevka. Njihovom se upotrebom smanjuje sklonosti pojavama odlupljivanja, penetracije i drugim pogreškama. Upotrebom premaza povećava se i vatrostalnost kalupa. Svi premazi uglavnom sadrže tri komponente: vatrostalno punilo, otapala i određene emulgatore [16].

Punilo je obično kvarcno, kromitno ili cirkonsko brašno. Otapalo je voda ili alkohol. Premazi se najčešće isporučuju u obliku paste, rjeđe već pripremljeni.

Na slici 21 je jasno vidljivo kako se s kalupni premazom postiže bolja livljivost. Također može se uočiti kako je to povećanje livljivosti nešto veće kod veće pregrijanosti taline.



Slika 21. Utjecaj kalupnog premaza na tečljivost pri temperaturi pregrijavanja od 70°C i 130°C [6]

4.6. Utjecaj viskoznosti na livljivost

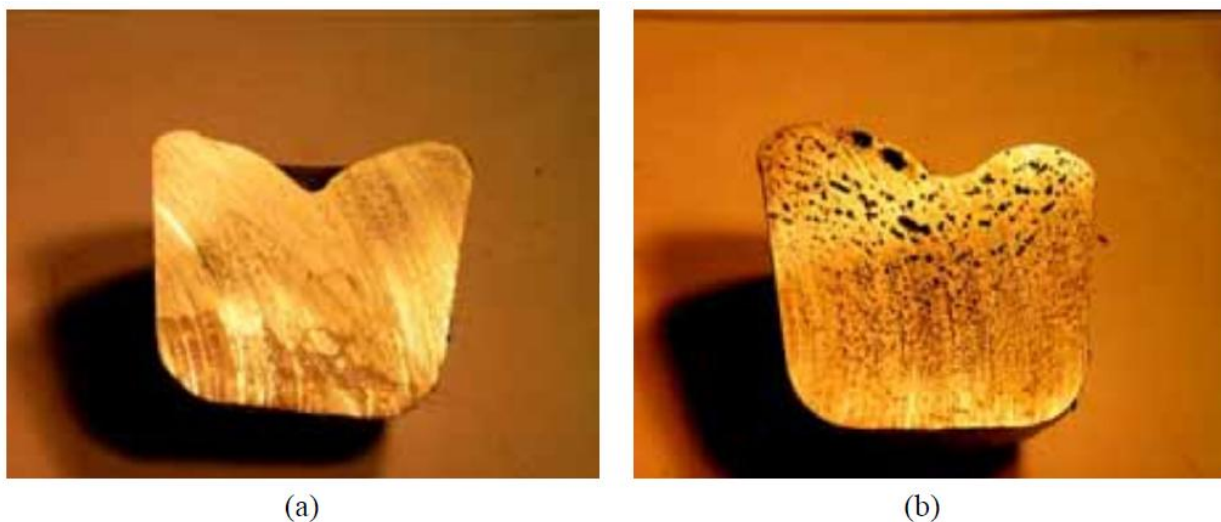
Viskoznost rastaljenih metala je mala, npr. manja od 0,003 Pas za Al-7Si-Mg leguru. Znači da se može zanemariti utjecaj viskoznosti na livljivost metala dok god je on tekući tijekom lijevanja. Viskoznost i površinska napetost su možda važni samo kod ekstremno tankostjenih odljevaka. Prema istraživanjima Ragone-a i Flemings-a utjecaj viskoznosti na livljivost je minimalan [6].

4.7. Utjecaj čistoće taljevine na livljivost

Čistoća taljevine ima velik utjecaj na livljivost. Groteke je utvrdio da se livljivost može povećati do 20% ako taljevinu A319 očistimo s halogenim plinovima (*D.E. Groteke, AFS Trans. 93 (1985) 953–960*). Potrebno je posebno obratiti pozornost na sadržaj vodika i oksidnih čestica u taljevini [11]. Ostala istraživanja pokazuju vrlo mali ili nikakav utjecaj nečistoća na livljivost.

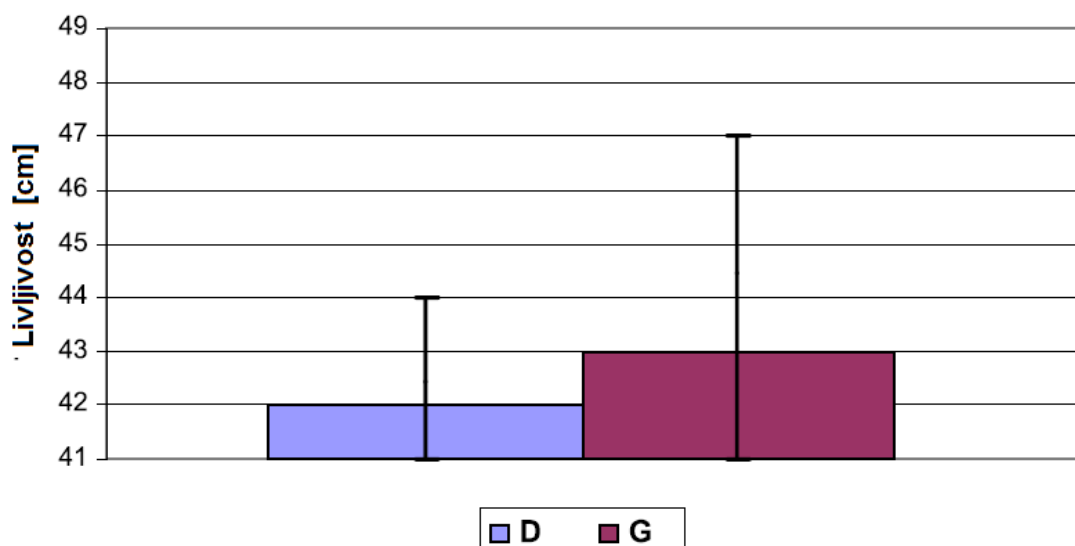
4.8. Utjecaj vodika na livljivost

Slika 22 prikazuje dva uzorka od kojih je jedan s niskim sadržajem vodika, jer je otplinjavan s argonom, dok drugi nije otplinjavan i ima visok sadržaj vodika. Može se uočiti da što je veći sadržaj vodika to je veća poroznost, dok se ne primjećuje značajniji utjecaj na količinu uključaka. Zapravo, utvrđeno je da je sadržaj uključaka 2,2 ppm kod uzorka s niskim sadržajem vodika, dok je kod uzorka s visokim sadržajem vodika sadržaj uključaka 1,5 ppm [6].



Slika 22. Uzorci ispitivani pod smanjenim pritiskom: (a) uzorak otplinjavan s argonom i niskim sadržajem vodika; (b) uzorak koji nije otplinjavan i visokim sadržajem vodika [6]

Na slici 23 vidi se bitna razlika u livljivosti između uzoraka sa nižim i višim sadržajem vodika. Otplinjavani uzorak ima manju livljivost.



Slika 23. Livljivost legura s niskim (D) i visokim (G) sadržajem vodika. Standardna devijacija je prikazana vertikalnom linijom [6]

5. METODE ISPITIVANJA

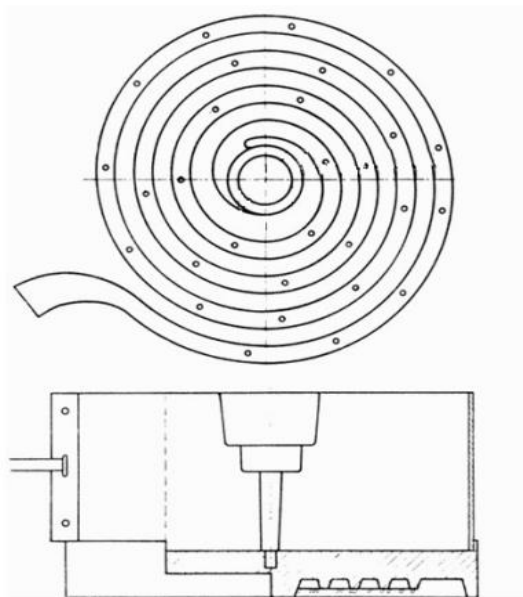
Kroz protekle godine u mnogim su ljevaonicama ulagali vrijeme i novac u metode za ispitivanje livljivosti. Tako postoje mnogi standardni testovi za ispitivanje livljivosti. Dva su uobičajena načina ispitivanja:

- lijevanjem spirale
- ispitivanje vakuumom

Kod vakuumskog testa livljivosti talina se usiše u prozirnu cijev s poznatim tlakom (podtlakom). Dužina koju talina prođe mjeri se te se dolazi do livljivost. Kod spiralnog testa talina se ulijeva u spiralno oblikovanu šupljinu malog poprečnog presjeka[10].

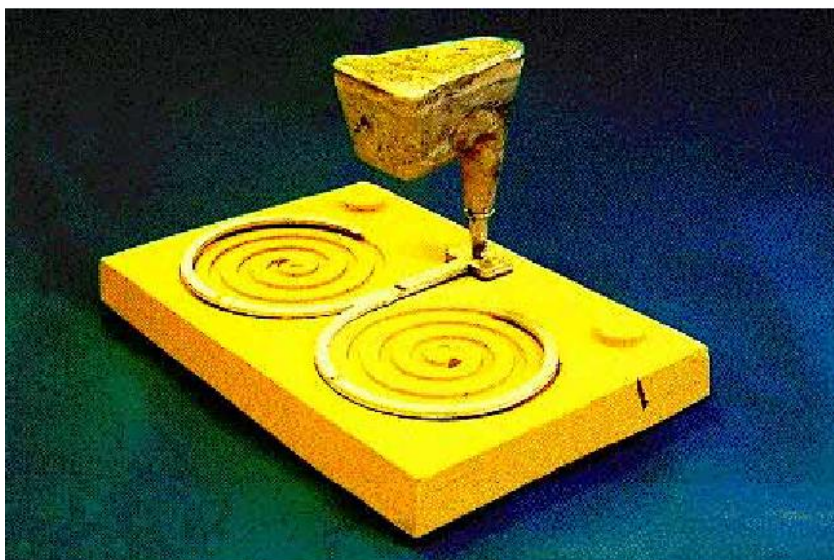
5.1. Ispitivanje livljivosti lijevanjem spirale

Ispitivanje spiralom koristi jednostavan koncept ispitivanja livljivosti, ali kada se razmotre svi parametri i detalji kroz ponavljanje ovog eksperimenta mogu se dobiti složeni rezultati. Ovaj test livljivosti se izvodi uglavnom s jednom spiralom, ali postoji i izvedba s dvije [12]. Osnovna oprema kojom se može napraviti ova ispitivanja su posuda za ulijevanje legure-čaša, okrugli konusni spust i jedna ili dvije spirale ovisno o tipu ispitivanja. Spirala bi se trebala odliti u kalup od kvarcnog pijeska prosječne veličine zrna od 0,15mm. Arhimedove spirale su poprečnog presjeka $4 \times 10 \text{ mm}^2$, tvoreći 3,5 puna kruga, što iznosi ukupno 1,2 m po svakoj spirali. Vrlo važno je odzračivanje spirala. Kod izvedbe sa spomenutim dvjema spiralama dolazi do problema kao što su nejednaki tlakovi te različite temperature, slika 25 [10].



Slika 24. Prikaz spiralnog kalupa za ispitivanje livljivosti

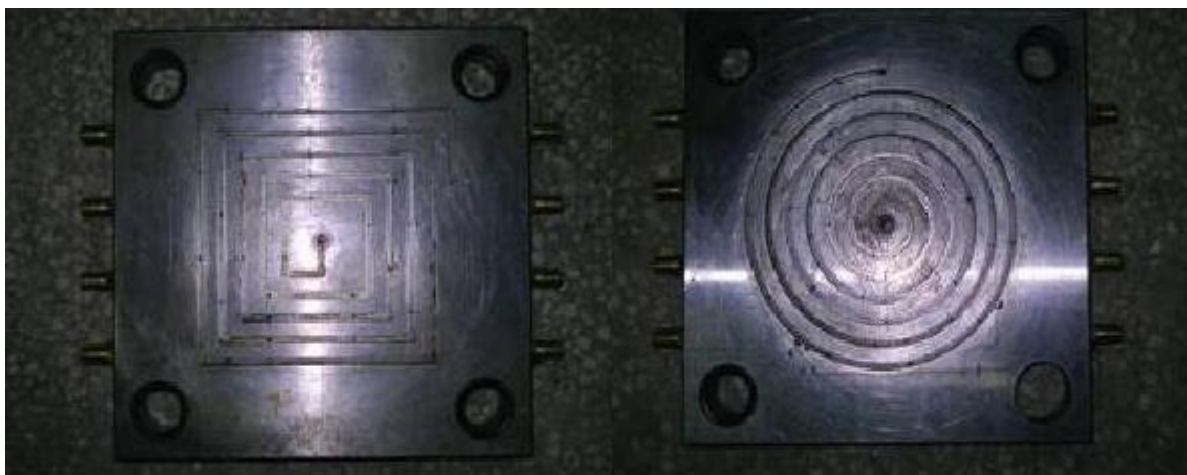
Lijevanje se izvodi ručno iz peći. Temperaturu rastaljenog metala treba izmjeriti umjerenim termoparom tik prije ulijevanja iz lonca u kalup. Taljevinu se ulijeva sve dok se u potpunosti ne popuni čaša [10].



Slika 25. Ispitivanje livljivosti s dvije spirale [10]

Pošto je odljevak u obliku spirale za ovo ispitivanje je potrebno malo prostora, što je svakako jedna od prednosti ovog ispitivanja.

Sippova spiralna proba je najčešći način određivanja livljivosti čistih metala i legura. Može biti izrađena od pijeska, metala ili grafita. Presjek joj može biti kružni, pravokutni ili trapezni. Kod ove probe usporedivost rezultata pri istim parametrima eksperimenta izrazito je velika [19]



Slika 26 Sippova spiralna proba (pravokutna i okrugla) [19]

5.2. Ispitivanje livljivosti vakuumom

Ispitivanje livljivosti uz pomoć vakuuma poznaje dvije metode [12]:

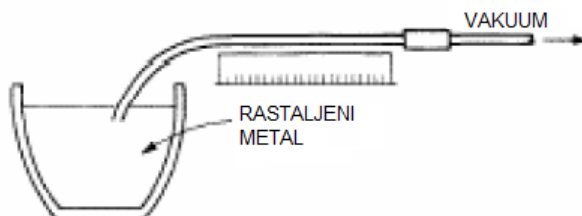
- horizontalna metoda
- vertikalna metoda

Kod ovih metoda osnovni princip jest usisavanje rastaljenog metala se usisava u tanku cijev pomoću vakuuma i dobivanje odljevaka određene dužine.

Horizontalno usisavanje vakuumom

Kod ove metode koristi se retorta u koju se stavlja rastaljeni metal. Retorta je vrsta laboratorijskog posuđa koje je služilo za destilaciju, isparavanje lakoisparljivih tekućina iz predloška i provođenje nekih reakcija. Sastoji se od posude s dugim, spuštenim grlom. Grlo ima funkciju zračnog hladila. Retorta je danas praktično u potpunosti izašla iz uporabe jer su je zamijenili moderni dijelovi aparatura sa

standardiziranim brušenim grlima, od kojih se mogu izraditi cijele nepropusne aparature otporne na koroziju [13]. Nakon što dostigne željenu temperaturu, vakuumom se usisava. Tako se taljevina razvuče kroz staklenu cijev, a završna duljina metala u cijevi predstavlja se kao livljivost, slika 27.



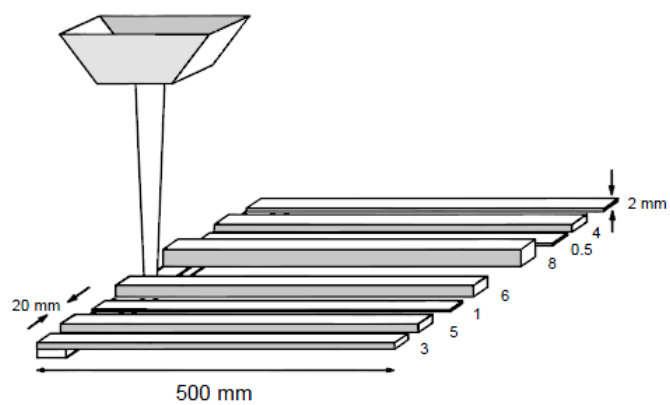
Slika 27. Horizontalni vakumski test [14]

Kod tradicionalnog postupka dio taljevine bi tekao i uslijed gravitacije zbog zakrivljenosti cijevi retorte. Osnovna metoda je imala čep od voska koji je brtvio vrh vakuumom ispunjenu cijev, u daljnjim eksperimentima taj čep je izbačen. Ispitivanje se u početku radilo samo s čistim metalima, a poslije u laboratoriju i sa legurama. Također, ovom metodom je otkriveno kako taljevine mogu promijeniti mehanizam skrućivanja dodatkom određeni legiranih elemenata. Ovaj horizontalni test se uglavnom upotrebljavao u istraživanjima vezanim za mikrostrukture i mehanizme skrućivanja.

5.3. Ostali testovi

Postoji znatan broj testova livljivosti. Livljivost se može testirati u trajnim kalupima, ubrizgavanjem taline tlačnim lijevom u krivudavu kalupnu šupljinu, postoje razni testovi kod kojih se lijevaju razni oblici poput lamela, ploča i oštrica te još drugi testovi. Jedan od primjera ispitivanja trajnim kalupima je lijevanje u N-Tec kalup. Ta metoda je po principu slična lijevanju spirale, samo je kalupna šupljina sastavljena od pet kanala različitih poprečnih presjeka. U ovom eksperimentu livljivost je predstavljena kroz dužinu koju je rastaljeni metal popunio u svih pet kanala [12].

U proteklim godinama na University of Birmingham je razvijen test jednostavnijeg oblika. Zadnja varijanta testa ima niz dugih traka raznih debljina koje se istovremeno pune taljevinom. Jedan kalup, slika 28, pruža niz dobivenih vrijednosti za livljivost, a u ovisnosti o debljini stijenke [14].



Slika 28. Ispitni uzorak s više kanala [14]

6. EKSPERIMENTALNI RAD

Eksperimentalnim dijelom rada cilj je prikazati pojedine utjecaje na livljivost aluminijskih legura. U ovom dijelu prikazan je utjecaji temperature lijevanja na livljivost, utjecaj usitnjavanja zrna, te utjecaj modifikacije taline.

Praktičan rad je izveden u Laboratoriju za ljevarstvo na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

6.1. Utjecaj temperature i sastava materijala na livljivost AlSi legure

Ljevane su se dvije različite legure u pješčane kalupe. Kalupna šupljina je u obliku spirale. Lijevanje je provođeno s tri različite temperature, i to 730°C, 700°C i 670°C. Ljevane su legure AlSi12 i AlSi12Mg(Cu).

Cilj ovog eksperimenta bio je utvrditi ovisnost livljivosti o temperaturi ulijevanja i vrsti legura.

6.1.1. *Izrada jednokratnog pješčanog kalupa*

Izradom kalupa započela je izvedba prvog eksperimenta. Za izradu kalupa koristio se model spirale slika 29. Model je utisnut u pijesak koji je prethodno bio u kalupniku te na taj način dobiva svoju funkciju. Kada se jednom pripremi model spirale on se može koristiti do kraja eksperimenta.



Slika 29. Model spiralne probe

Pripremljeni model omogućava izradu gornjeg dijela kalupa. Izrada kalupa se nastavlja tako što se kalupnik postavlja u poziciju za izradu gornjaka, te se međusobni geometrijski odnos modela i postavljenog kalupnika osigura. Po postavljanju i osiguravanju površina modela se posipa sredstvom protiv prijanjanja, likapodijem, slika 30. Na tako posipanu površinu prvo se stavlja modelni pijesak, u koji se umeće uljevni sustav, koji se za ovaj eksperiment sastoji od uljevne čaše i spusta.



Slika 30. Posipanj modela likapodijem I stavljanjem modelnog pjeska

Na modelni pijesak se stavlja punidbena kalupna mješavina te se vrši prvo sabijanje kalupa pneumatskim sabijačem, slika 31. Nakon prvog sabijanja kalupnik se dodatno

nadopunjuje punidbenom kalupnom mješavinom te se dodatno sabija ručnim alatom za sabijanjem.



Slika 31 Sabijanje nakon stavljanja dopunske kalupne mješavine

Nakon završnog ručnog sabijanja ostaje višak materijala koji se uklanja. Po završetku uklanjanja viška materijala vade se modeli uljevne čaše i spusta te se kalup pažljivo podiže sa modela kako se ne bi narušila dobivena geometrija šupljine.



Slika 32. Kalupna šupljina gornjaka

Drugi dio kalupa, odnosno donjak, slika 33, je dio u kojem nema kalupne šupljine. Njegova je funkcija da svojom ravnom površinom zatvori geometriju spiralne šupljine. Iako nema šupljine površina donjaka je, isto kao i kod gornjaka, od modelnog pijeska dok je ostatak kalupnika popunjen punidbenom kalupnom mješavinom. Dobiveni donjak izgleda kao na slici 33.



Slika 33. Donjak

Na kraju izrade dva kalupna dijela se poklapaju te im se osigurava međusobna pozicija. Lijeivano je po tri spirale u jednom postupku taljenja legure, zbog zapremnine grafitnog lonca u peći, slika 34.



Slika 34. Gotovi kalupi

6.1.2. Priprema taljevine za ulijevanje

Kod ovog eksperimenta korištene su, već spomenute, dvije legure AlSi12 i AlSi12Mg(Cu) . Za taljenje materijala korištena je elektrootporna peč tvrtke Elektrosanitarij, slika 35. Zbog relativno velikog potrebnog vremena da se materijal rastali (u zagrijanoj peč vrijeme je približno 1 sat), a relativno maloj zapremnini peći (oko 5 kg aluminija), eksperiment se odvijao kroz 4 lijevanja, odnosno 4 dana.



Slika 35. Elektrootporna peč

Kako bi se ubrzao proces taljenja temperatura je namještena iznad, maksimalno potrebnih za ovaj dio eksperimenta 730°C . Odlučeno je da se taljevina namjerno dodatno pregrije kako se ne bi prebrzo ohladila zbog velikih gubitaka prilikom prelijevanja iz nagibne peći u lonac za lijevanje.



Slika 36. Mjerenje temperature i preljevanje taline u ljevački lonac

Kao što je vidljivo na slici temperatura taline u peći je veća i od 800°C . Prilikom pretakanja se gubi toplina, a pad temperature na željenu vrijednost se čeka pokraj kalupa uz konstantno mjerenje. Kada temperatura padne na željenih 730°C lijeva se prva spirala, a zatim na temperaturama 700°C i 670°C druga i treća. Lijevanje u kalup se izvodi dok se do vrha ne ispuni uljevna čaša. Nakon lijevanja odljevci se hlade, te imamo situaciju kao na slici 37.



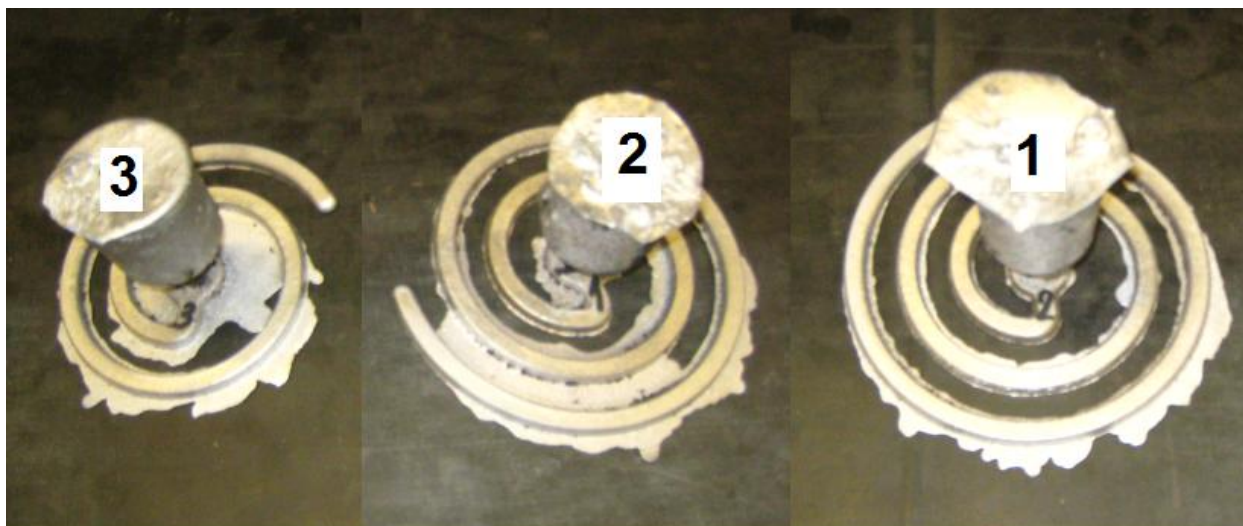
Slika 37. Gotove spirale

6.1.3. Rezultati lijevanja u jednokratni pješčani kalup

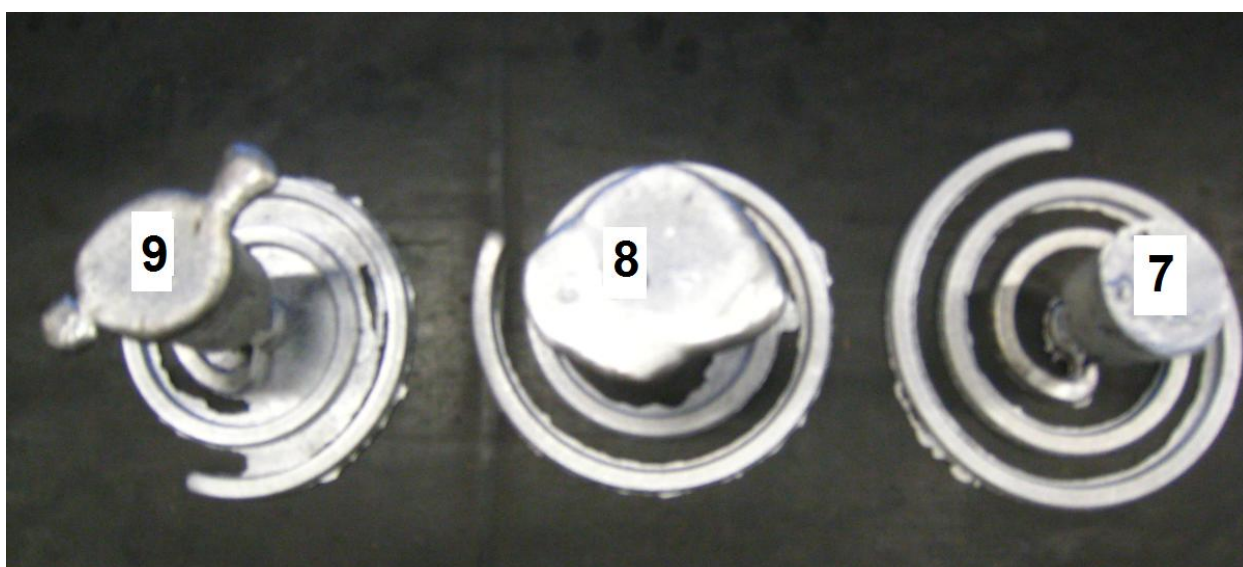
Lijevanje spirale u sviježu kalupni mješavinu se pokazalo problematično. Zbog teške izrade kalupa došlo je do izlivanja po razdjelnoj površini, a u krajnjem slučaju i velike greške kod pojedinih spiralnih uzoraka. U tablici 4 prikazani su rezultati ispitivanja za lijevanja broj 1 i 3, odnosno za leguru AlSi12Mg(Cu)

Tablica 4. Dužine spirala za lijevanje serije 1 i 3 (AlSi12Mg(Cu))

Lijevanje broj	Temperatura °C	Dužina spirale mm	
1	730	1068	1
	700	944	2
	670	624	3
3	730	1090	7
	700	965	8
	670	822	9



Slika 38. Lijevanje spirala broj 1



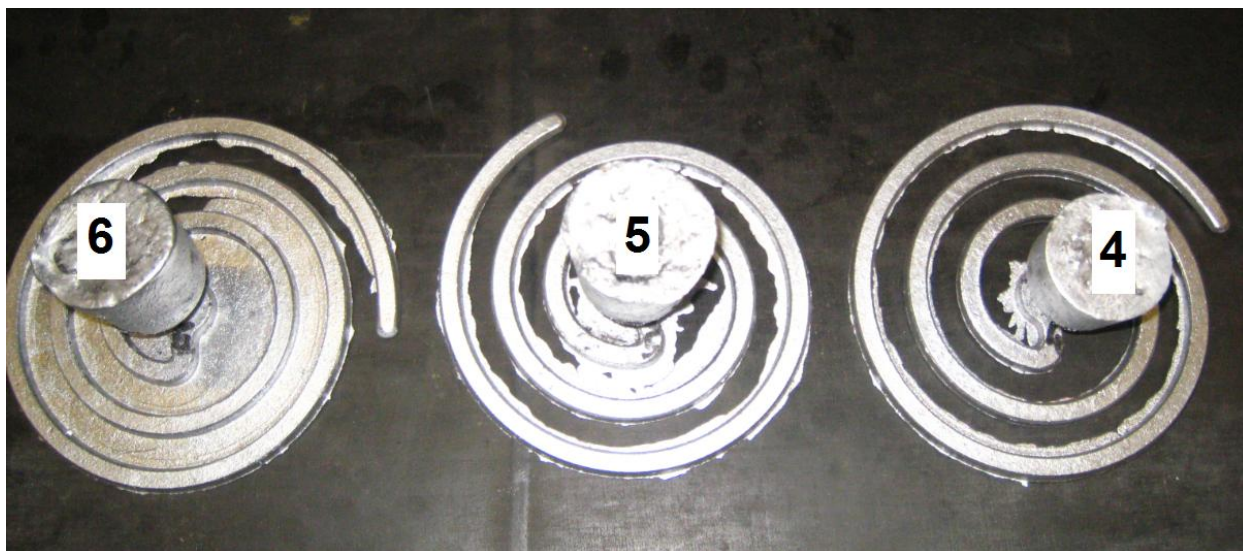
Slika 39. Lijevanje spirala broj 3

Kod prvog lijevanja (lijevanje broj 1), a vidljivog na slici 38, rezultati su u skladu s temperaturama ulijevanja, na temperaturi od 730°C zamjećuje se najveća livljivost dok je pri 670°C livljivost najmanja. Po pitanju temperature rezultati drugog lijevanja, s istim materijalom, (lijevanje broj 3) također su očekivani. Tako je livljivost najveća na 730°C te s padom temperatura pada i livljivost.

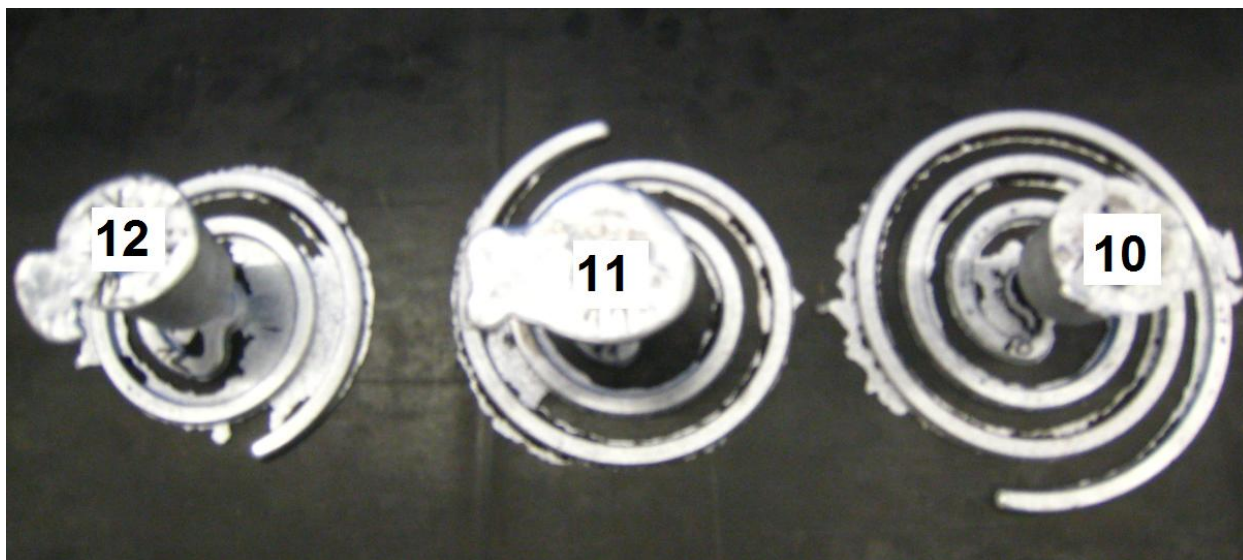
Tablica 5. Dužine spirala za lijevanje serije 2 i 4 (AlSi12)

Lijevanje broj	Temperatura °C	Dužina spirale mm	
2	730	1202	4
	700	1073	5
	670	1263	6
4	730	1433	10
	700	1045	11
	670	777	12

Na slikama 40 i 41 prikazane su spirale iz lijevanja broj 2 i 4. Ta lijevanja su izvođena legurom AlSi12.



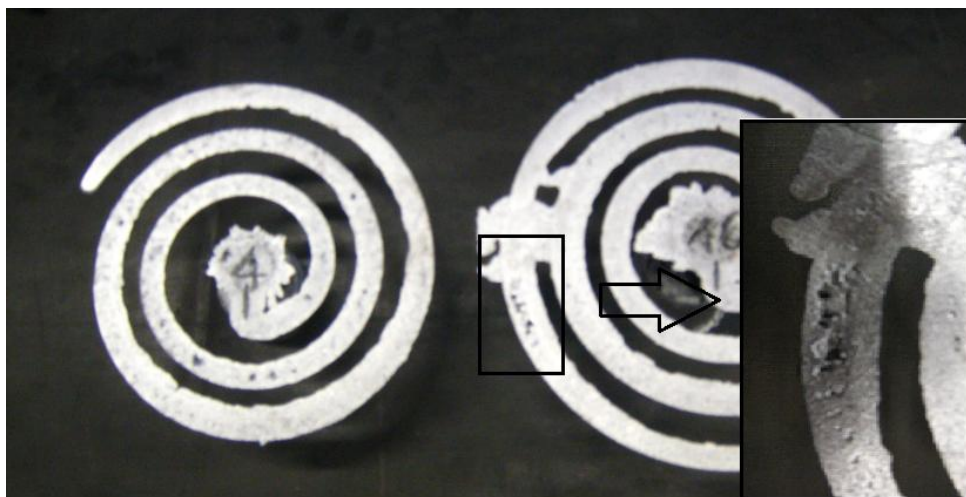
Slika 40. Lijevanje spirala broj 2



Slika 41. Lijevanje spirala broj 4

Ukoliko obratimo pozornost na dobivene rezultate (kod lijevanja broj 2 i 4) i temperaturu ulijevanja može se reći da eksperiment zadovoljava kriterij po kojem bi materijal trebao imati bolju livljivost pri većim temperaturama.

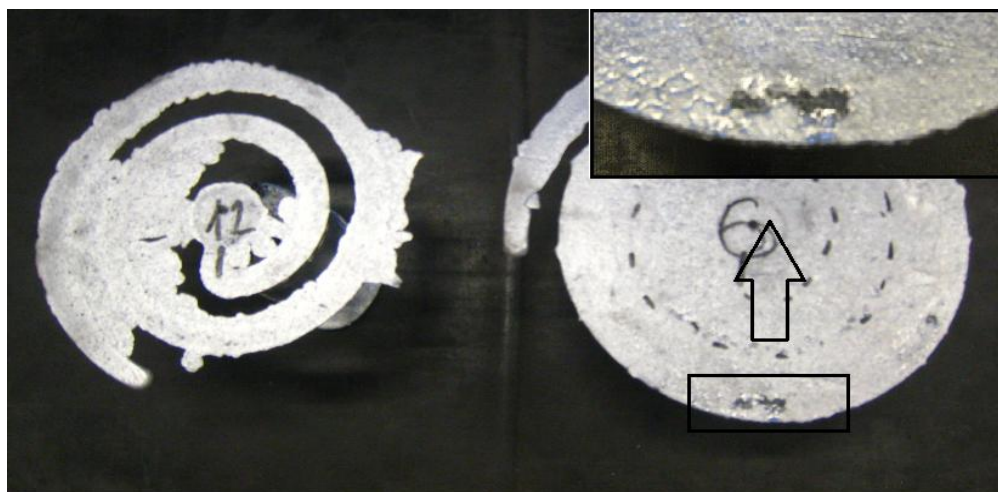
Kod lijevanja broj 2 i 4 na 700°C rezultati su slični, a time i prihvatljivi. To se ne može reći za temperature 670°C i 730°C. Uspoređujući dobivene spirale na tim temperaturama može se vidjeti i razlog takvog stanja, slika 42.



Slika 42. Usporedba spirala 4 i 10

Uspoređujući spirale sa slike 42 vidi se pojava poroznosti i povećanog srha na spirali 10 (lijevanje broj 4/730°C), a u blizini područja prekida spirala 4 (lijevanje broj 2/730°C). Prilikom prolaska taljevine kroz spiralnu i stvaranja zazora kroz isti je isteklo dovoljno taline da se počne stvarati dio spirale u susjednom zavoju. Novonastali i pogršni dio spirale se stvara dok je materijal tekao, dok je u međuvremenu glavni dio spirale dolazio normalno kroz šupljinu. Spajanjem tih dvaju tokova materijala došlo je do gomilanja materijala, i to vjerojatno različitih temperatura. Takvo gomilanje materijala često se prezentira kroz usahline što je i vidljivo sa slike. Ovo objašnjenje sugerira na ispravnost dobivene livljivosti kod spirale 4, dok je spirala 10 greška.

Slična pogreška se dogodila kod lijevanja spirala na temperaturi 670°C, odnosno spirala 6 (lijevanje broj 2/670°C) i 12 (lijevanje broj 4/670°C), slika 43.



Slika 43. Usporedba spirala 6 i 12

Vidljive su usahline kao i kod prethodno objašnjenog slučaja. Pretpostavlja se da je kod spirale broj 6 kroz zazor na razdjelnoj površini prošlo dovoljno materijala da bi se na drugom mjestu počela stvarati nova spirala. Kada se spoje glavna spirala, koja teče normalno kroz kalupnu šupljinu, i spirala koja je nastala zbog greške dolazi do gomilanja materijala, te kao rezultat nastala je usahlina.

Sagledajući cijeli eksperiment (lijevanja broj 1, 2, 3, 4) definitivno se može reći da čisti AlSi12 ima znatno bolju livljivost od legure AlSi12Mg(Cu). Taj zaključak se odnosi za sve temperature ulijevanja. Zbog bolje livljivost čistog AlSi12 javlja se i više srha po razdjelnoj površini nego kod nečistog materijala.

6.2. Utjecaj na livljivost modifikacijom i usitnjavanjem zrna AlSi legure

6.2.1. Priprema za ulijevanje

U ovom dijelu eksperimenta razmatrat će se kako titan i natrij utječu na livljivost legure. Odnosno kako se mijenja livljivost ako usitnimo zrna i modificiramo talinu legure. Dodavanje se izvodi u određenim masenim postotcima, stoga je potrebno vaganjem utvrditi masu legure koja se stavlja u peć, slika 44.



Slika 44. Vaganje aluminjske legure

Vrlo važno je napomenuti da se kod ovih eksperimenata temperatura mjerila u samoj peći. To se radilo zato što je lončić kojim se vadila taljevina i ulijevala u kokilu bio mali, pa bi samo mjerenje u njemu bilo otežano. Temperatura kod ovog postupka mjeri se termometrom s termoparom CEM DT-618B, slika 45. Za oba slučaja je odlučeno da to budu temperature od 710°C, 680°C i 650°C.



Slika 45. Termometar CEM DT-610B

Predgrijavanje kokile



Slika 46. Kokila [19]

Prije svakog novog ulijevanja potrebno je predgrijati kokilu. Predgrijavanje je vršeno na grijaćoj ploči, slika 47. Temperatura kuhala je oko 250°C tako da se kokila svaki put predgrijavala na 200°C.



Slika 47. Predgrijavanje kokile

Temperaturu kokile smo mjerili uz pomoć termokrede, slika 48. Ona je odlično rješenje pri mjerenju površinske temperature ukoliko nam je samo bitna donja granica primjene. Obično se koristi prilikom zavarivanja, toplinske obrade ili kao i u ovom slučaju u ljevaonicama. Kreda za ovo mjerenje se otapa pri postizanju 191°C.



Slika 48. Termokreda za određivanje temperature površine

Uz kokilu potrebno je pripremiti i taljevinu. Kao i kod prvog eksperimenta (lijevanja u pijesak) materijal smo rastalili u elektrootpornoj peći. Kod pripreme za drugi dio eksperimenta bilo je potrebno dodati dodatne elemente prema prikazanim postupcima u sljedeća dva poglavlja. Po izvršavanju postupaka i postizanja potrebne temperature taljevine pristupilo se lijevanju u pripremljenu kokilu slika 49.



Slika 49. Ulijevanje taljevine u kokilu

6.2.2. Usitnjavanje zrna legure

Usitnjavanje zrna obrađeno je u poglavlju 4.2.

Titan je jedan od najznačajnijih sredstava za postizanje sitnijeg zrna u strukturi. Njega se dodaje u malim količinama, uglavnom znatno manje od 1%. U ovom eksperimentu dodavao se titan kroz predleguru AlTi10, dok se najčešće dodaje AlTi5B1. Za potrebe eksperimenta dodano je 0,06% predlegure, odnosno 1,59g u odnosu na 2735g aluminijske legure (0,058% zbog praktičnog razloga).



Slika 50. Vaganje predlegure AlTi10

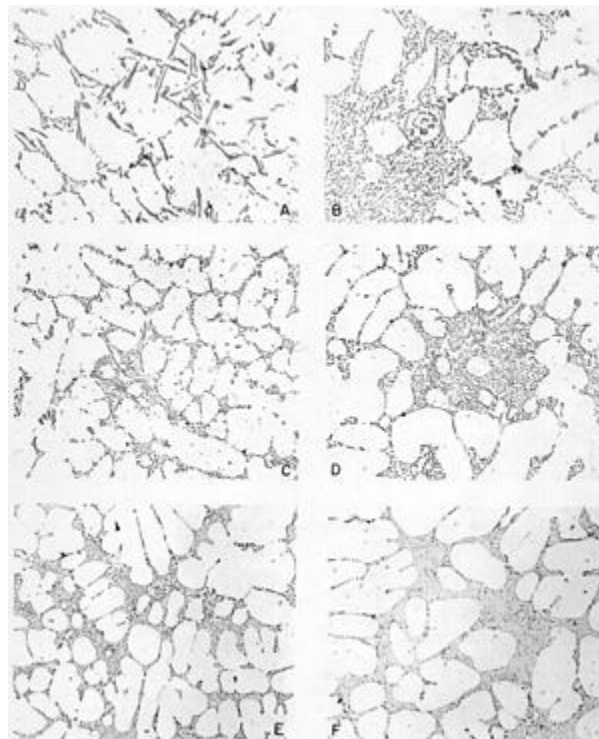
Nakon dodavanja Ti, te čekanja određenog vremena kako bi se titan rastalio i pomješao, pristupilo se lijevanju. Lijevanje se vršilo od najviše temperature prema najmanjoj.

6.2.3. Modifikacija legure

Eutektičkom modifikacijom postiže se transformacija lamelarnih ili listićavih oblika eutektičkog silicija u vlaknasti oblik. Modifikacijom se mijenja mehanizam rasta eutektičkog silicija, dok aluminijska faza nije zahvaćena. Time se dobiva struktura slična kompozitima uz povećanje maksimalne vlačne čvrstoće, plastičnosti, tvrdoće i mogućnosti strojne obrade. Željena struktura može se dobiti na dva načina: dodavanjem kemijskih modifikatora ili brzim hlađenjem. Važno je reći da je modifikacijom zahvaćena samo silicijeva faza [15].

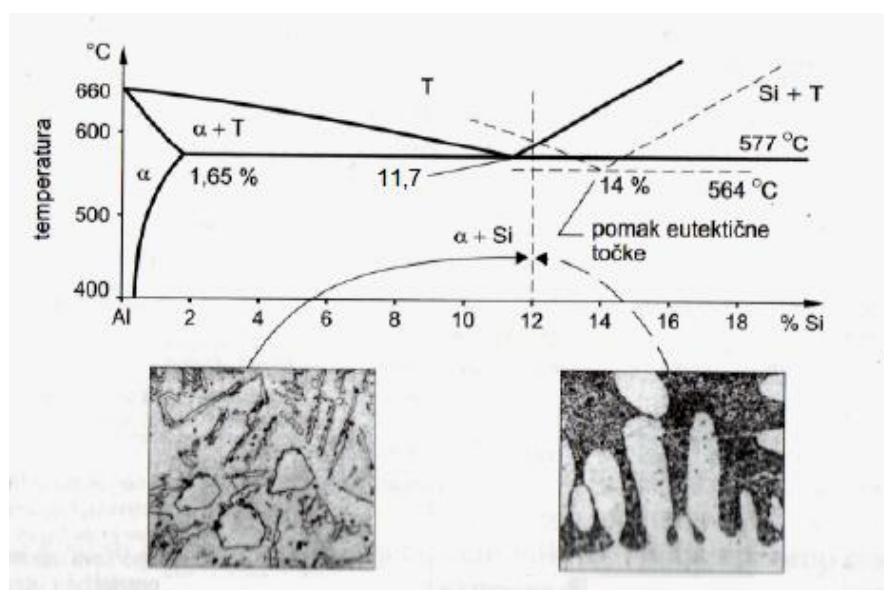
Kemijski modifikatori su sredstva (elementi) koji se ciljano dodaju u taljevinu radi promjene oblika silicijeve faze u zaobljeniji oblik, koji je mnogo koherentniji s metalnom aluminijskom maticom. Najpopularnije objašnjenje govori kako se modifikacijom suzbija rast kristala silicija unutar eutektika, pružajući bolju raspodjelu lamela u rastućem eutektiku [20]. Ova promjena oblika silicijeve faze djeluje na disperziju poroznosti od

stezanja pri skrućivanju i znatno poboljšava mehanička svojstva i strojnu obradivost legure. Kod podeutektičkih legura, za modifikaciju Si faze upotrebljavaju se elementi kao što su natrij, kalcij, stroncij, antimon, a za usitnjavanje Si faze kod nadeutektičkih legura upotrebljava se fosfor [15].



Slika 51. Varijacija modificiranosti taline aluminij silicij od nemodificirane (A) do jako modificirane (F) [20]

Na slici 52 se vidi kako se pomiče eutektička struktura prema desno. To znači kako je potreban veći udio silicija da bi se stvorili primarni kristali silicija β' .



Slika 52. Zbivanja pri modificiranju eutektičke legure Al-Si s 12%Si [1]

Za potrebe ovog eksperimenta dodavao se natrij u obliku natrijeve soli. Natrij (Na) se vrlo brzo otapa i raspršuje u taljevini bez oksidacije, ali brzo gubi djelotvornost (< 20 min), premda unutar tog vremenskog raspona ima odličan modifikacijski efekt. Natrij se može dodavati u zatvorenim vakuumiranim aluminijskim konzervama ili u obliku natrijevih spojeva u sredstvima za prekrivanje taljevine (tablete, praškaste komponente). Dodavanje natrija više od 0,2 % uzrokuje premodifikaciju koja uzrokuje stvaranje spoja AlSiNa i slabljenje mehaničkih svojstava. Natrij ima najjači efekt stvaranja fino vlaknaste strukture, odnosno stvara najpovoljniji oblik i raspored Al-Si eutektika. Zbog toga se često koristi kod izrade velikih i debelostijenih odljevaka lijevanih u pješčane kalupe. Veliki nedostatak natrija je što se gubi u taljevini, pa ga je potrebno kontinuirano dodavati radi dobrog učinka modifikacije (nije trajan modifikator) [15].



Slika 53. Modiklait

U 2740g aluminijske legure dodalo se 20g natrijeve soli. Nakon dodavanja Modikalita, proizvođača Termit. radilo se prema sljedećem predlošku [15]:

- na površinu taljevine dodaje se do 1 % Modikalita, slika 52, i pričekava se oko 5 minuta, zatim se modikalit i taljevina dobro promiješaju i nakon 5 do 10 minuta se odstranjuje troska, slika 53, te se nakon toga može ljevati
- rad s modikalitom nije opasan i osigurava dobra tehnološko – mehanička svojstva modificirane legure



Slika 54. Natrijeva sol na površini taljevine



Slika 55. Čišćenje troske



Slika 56. Mješanje taljevine

Postupak lijevanja u ovom eksperimentu je izveden od najniže temperature prema najvišoj. Zbog kratkotrajnosti djelovanja natrija može se očekivati pad njegova učinka, te bi spirala na najvišoj temperaturi mogla pokazati najmanji porast livljivosti.

6.2.4. Rezultati Ispitivanja

U tablici su prikazani rezultati ispitivanja livljivosti lijevanjem u kokilu. Lijevan je AlSi12 (sa 13% Si). Prvo je lijevan sam, a zatim sa dodatkom predlegure AlTi10, nakon toga je uslijedilo i lijevanje uz dodatak Modikalita

Tablica 6. Dužine spirala lijevanih u metalnoj kokili

	Materijal	Temperatura °C	Dužina spirale mm	
Usitnjavanje Zrna	AlSi12	710	548	1
		680	453	2
		650	263	3
	AlSi12+Ti	710	589	Ti 1
		680	423	Ti 2
		650	315	Ti 3
	AlSi12+Na	710	548	Na 1
		680	410	Na 2
		650	338	Na 3
Modifikacija Legure				



Slika 57. Spirale lijevane na 670°C



Slika 58. Spirale lijevane na 700°C



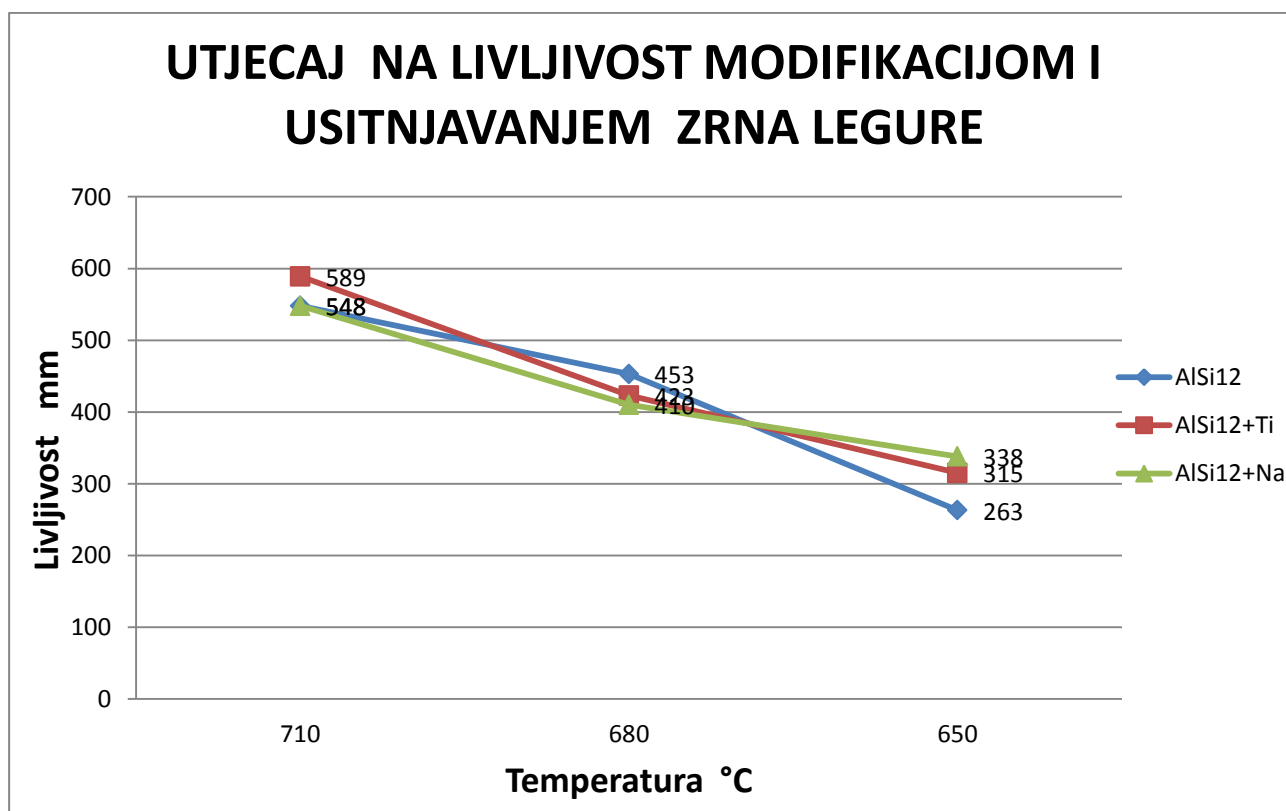
Slika 59. Spirale lijevane na 730°C

Kod spirala lijvanih na 650°C, prikazanih na slici 57, jasno je vidljivo, i to znatno povećanje livljivosti dodatkom titana, odnosno natrija. Važno je spomenuti da spirala modificirana natrijem (Na 3) je lijevana prva u seriji lijevanja modificirane taline, tako da je djelovanje Modikalita jako. Stoga je i vidljiv toliki porast.

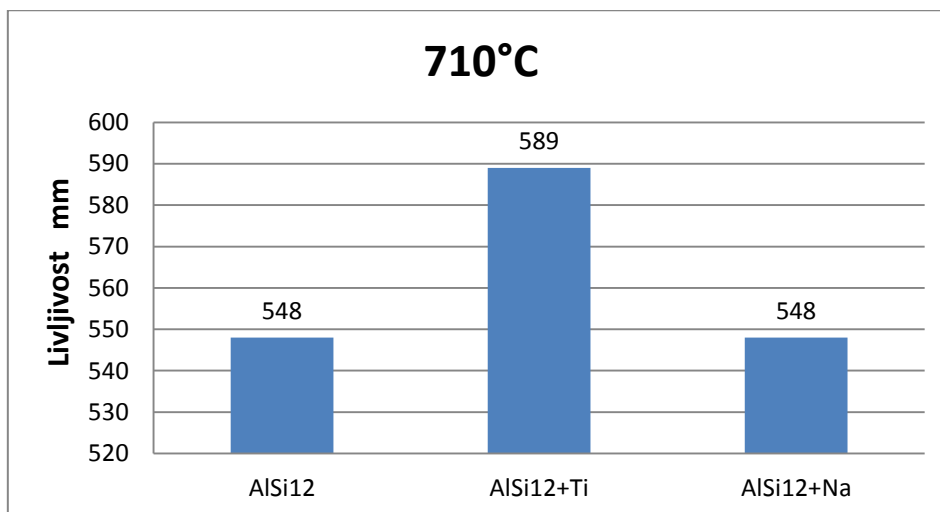
Kod lijevanja na temperaturi 700°C, livljivost nije pokazala ovisnost o dodacima. Kako je eksperimentalno lijevanje, kao i lijevanje uopće, komplicirano te ovisi o mnogim faktorima moguće je tražiti razlog ovih rezultata u teškoj održivosti uvjeta lijevanja. Primarno se misli na uvjete poput predgrijanosti kokile, brzine ulijevanja i načina mjerenja temperature taljevine.

Kod lijevanja na temperaturi 730°C jasno je vidljivo povećanje livljivosti legure s većim brojem klica kristalizacije (dodatak Ti). Kod dodatka natrija dolazi do očekivane pojave, a to je prestanak djelovanja modifikacije taljevine. Rezultat kod obične AlSi13 i AlSi13+Na je jednak. Ova situacija nedvojbeno ukazuje na problem promjenjive livljivosti legure s natrijem, a to je ograničeni vremenski period djelovanja.

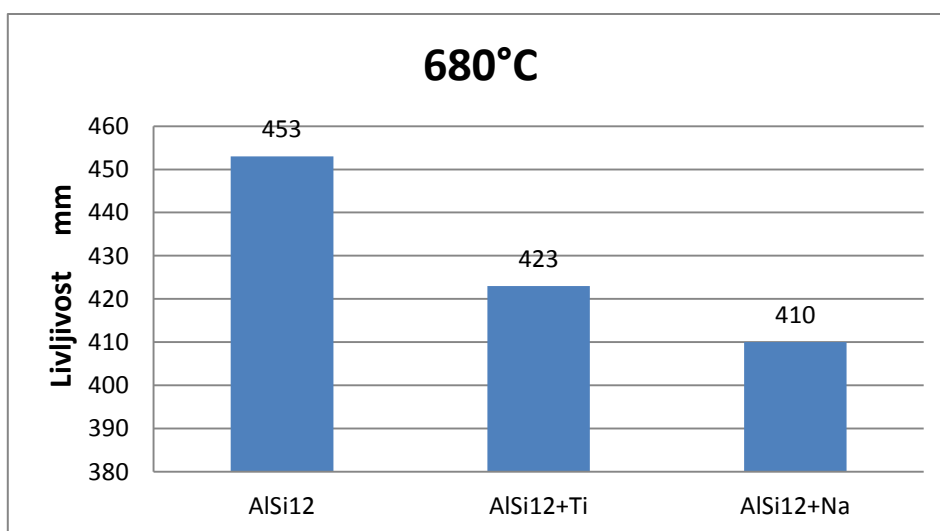
Trebalo bi primijetiti kako je izuzetno dobro povećanje livljivosti pri nižim temperaturama ulijevanja. To je bitno jer se kod lijevanja stvarnih predmeta u industriji lijeva baš na nižim temperaturama.



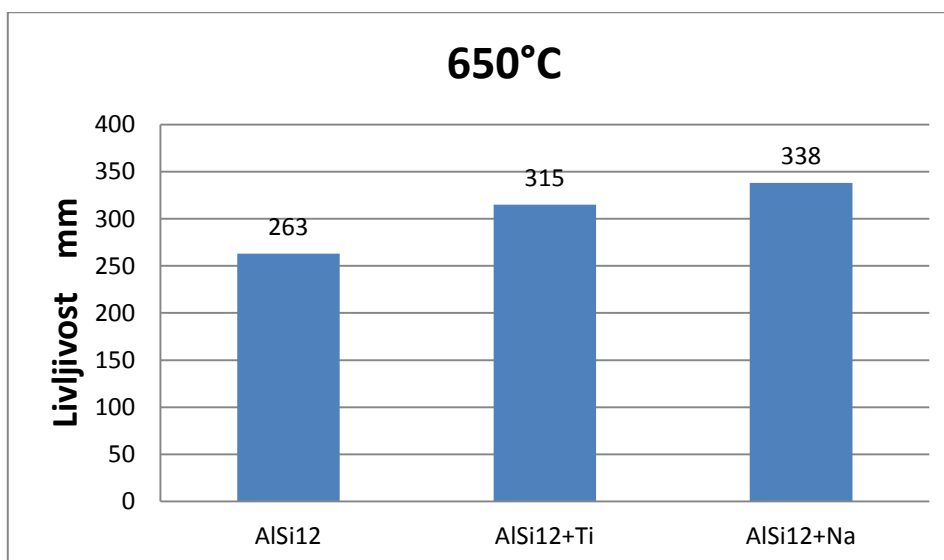
Slika 60. Utjecaj modifikacije kemijskog sastava i usitnjavanja zrna na livljivost Al –Si legura



Slika 61. Livljivost legura pri 710°C



Slika 62. Livljivost legura pri 680°C



Slika 63. Livljivost legura pri 650°C

6.3. Ispitivanje kemijskog sastava materijala

Ispitivanje kemijskog sastava obavljeno je u Laboratoriju za analizu metala Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Kemijska analiza je obavljena spektrometrijskom metodom na spektrometru oznake GDS 850A, firme Leco, slika 64. Ispitni uzorci se mogu vidjeti na slici 65.



Slika 64. Spektrometar GDS 850A



Slika 65. Uzorci za ispitivanje kemijskog sastava

Rezultati su prikazani tablicom 7.

Tablica 7. Rezultati ispitivanja kemijskog sastava

oznaka uzorka	%										
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Pb	Al
1	12,0	0,67	0,41	0,08	0,53	0,05	0,07	0,25	0,024	0,15	ostatak
2	13,0	0,03	0,00	0,02	0,04	<0,001	<0,01	0,03	0,013	<0,01	ostatak

Uzorak 1 dobiven je taljenjem više različitih odljevaka u peći. U odnosu na AlSi12 ima povećan udio željeza, bakra, magnezija i cinka. Materijal uzorka 1 je AlSi12Mg (Cu)

6.4. Metalografska analiza

Metalografska analiza materijala provedena je u Laboratoriju za materijalografska ispitivanja Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Kako bi uopće bila izvediva važno je dobro pripremiti ispitne uzorke, kao što je vidljivo na slici 66.

Uzorci su odrezani iz spirala, i to iz zone 50 mm od njenog kraja. Tako spremljeni uzorci stavljaju se, pojedinačno ili zajedno, u kalup te su zaliveni plastičnom masom. Uzorci su brušeni, a zatim polirani. Često se za promatranje i analizu mikrostrukture uzorci nagrizzaju blagim otopinama različitih kiselina. Za ovaj rad takvo što nije bilo potrebno, odnosno mikrostruktura odljevaka je promatrana i snimljena u nenagriženom stanju.

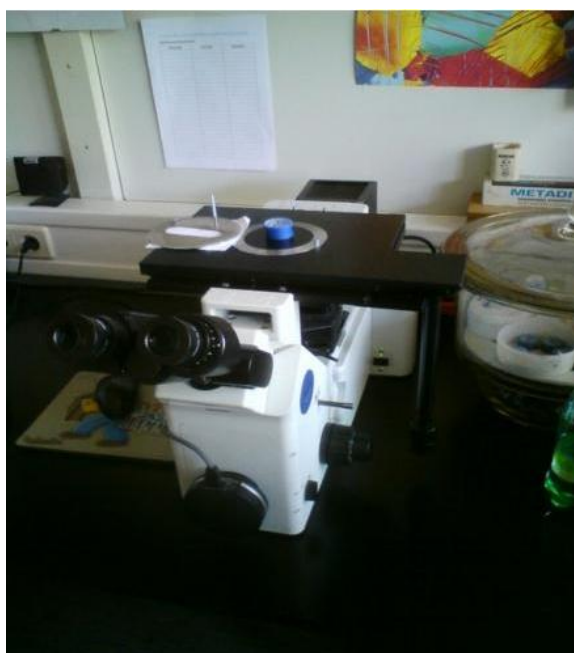


Slika 66. Uređaji za brušenje i poliranje uzoraka



Slika 67. Pripremljeni uzorci

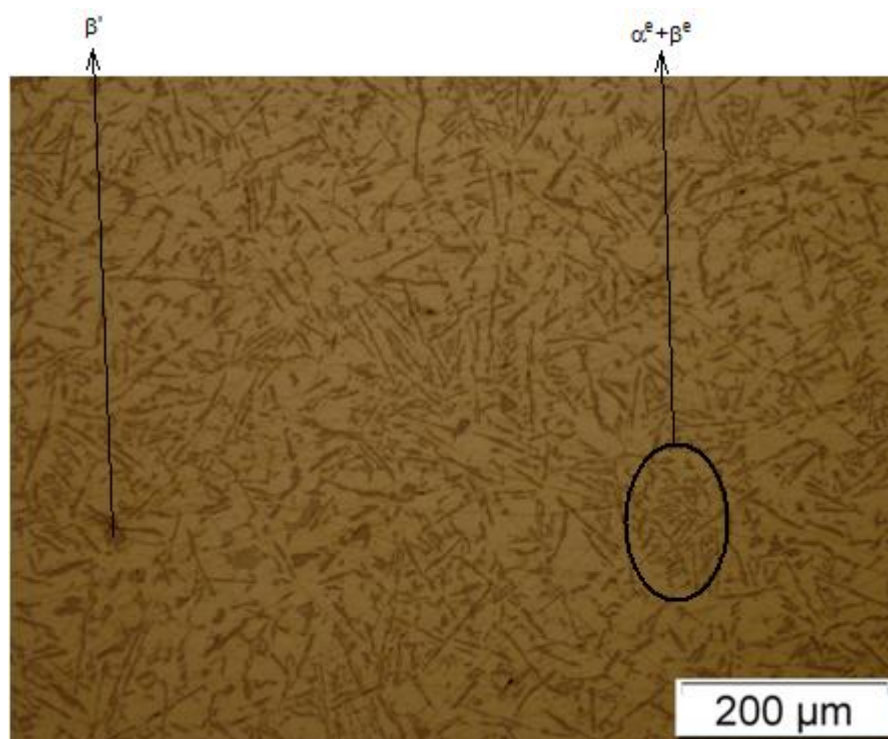
Pripremljeni uzorci su zatim ispitani na svjetlosnom mikroskopu „Olympus 6X S1“, slika 68. Mikroskop je opremljen kamerom, te tako možemo vidjeti sliku na zaslonu računala. Ispitivanje je provedeno na povećanjima 100x, 200x i 500x. Za prvi eksperiment mikrostruktura je ispitana za spirale 2 i 5 (lijevane na 700°C), dok je za drugi eksperiment mikrostruktura ispitana kod spirala lijevanih na 670°C (odabrana je ta temperatura jer je kod nje zamjećena najveća razlika u livljivosti).



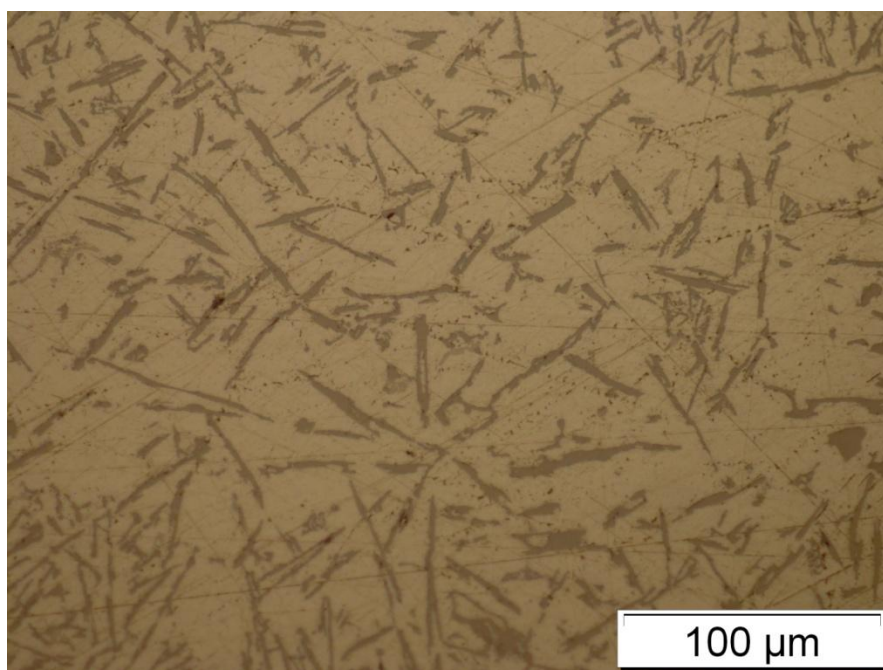
Slika 68. Svjetlosni mikroskop Olympus 6X S1“

6.4.1. Rezultati metalografske analize

AlSi12

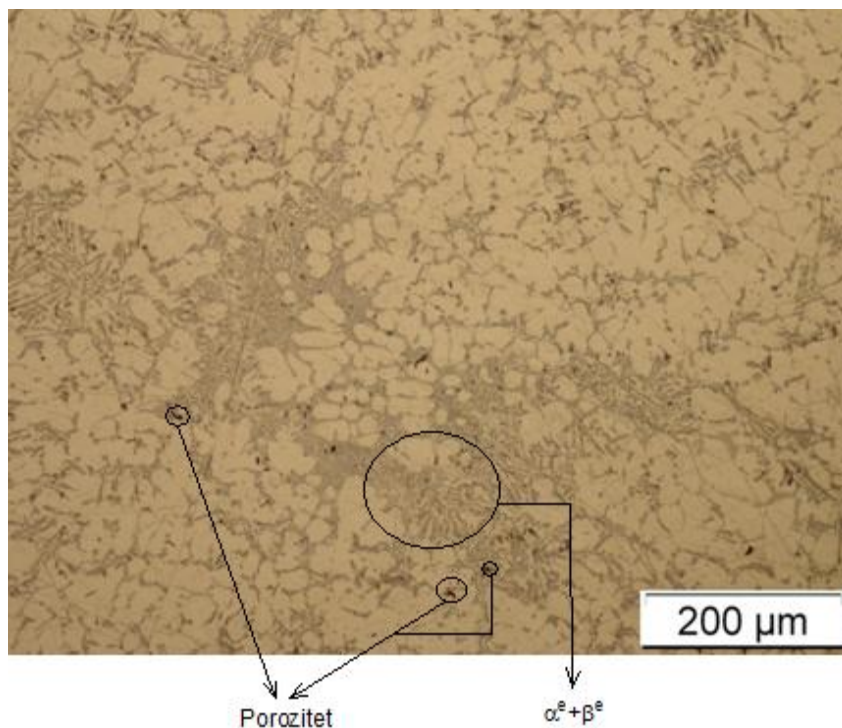


Slika 69. Prikaz mikrostrukture AlSi12 (200x)

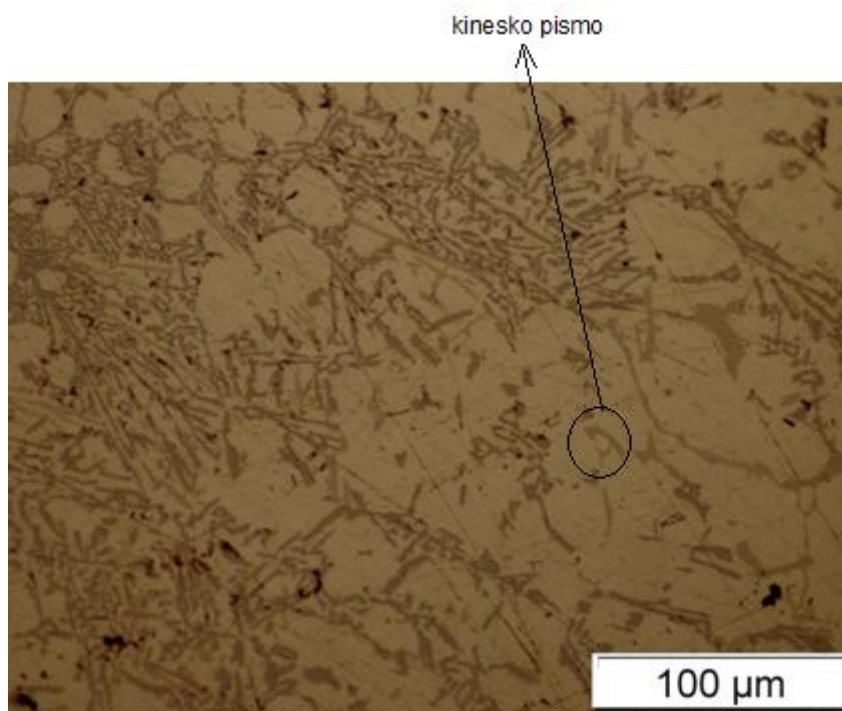


Slika 70. Prikaz materijala AlSi12 (500x)

Na slikama 65 i 66 prisutna je eutektička mikrostruktura koja se sastoji od eutektičkih kristala mješanaca α^e (Al i do 2% Si) i β^e , te β' kristala silicija (Si) kojih je vrlo malo. Oni su na slikama vidljivi kao iglice (β^e) i pločice (β') $\alpha^e + \beta^e$ Porozitet

AlSi12Mg (Cu)

Slika 71. Prikaz mikrostrukture AlSi12Mg (Cu) (x200)

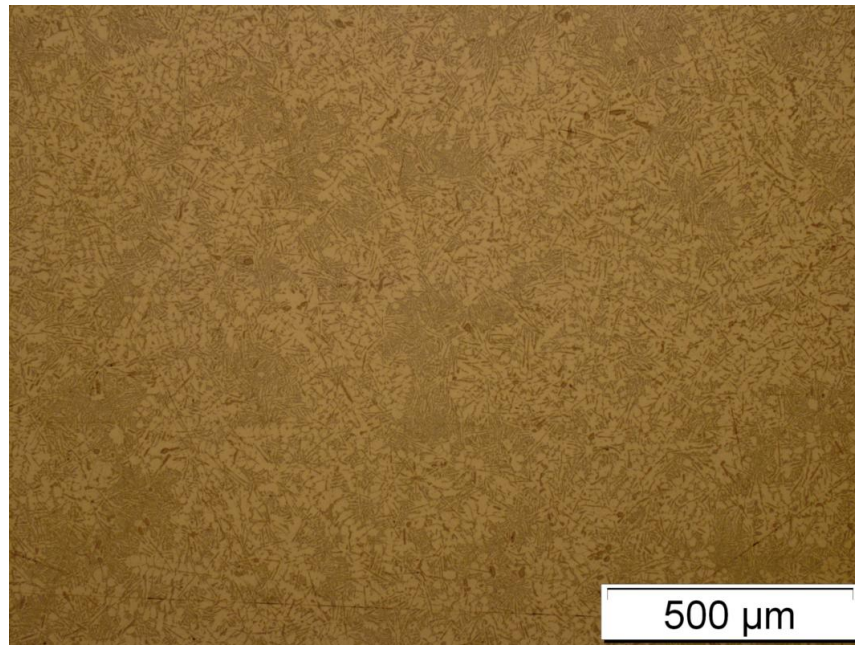


Slika 72. Prikaz mikrostrukture AlSi12Mg (Cu) (x500)

Struktura se sastoji od Al matrice (α^e) i od eutektičkih kristala silicija (β^e). Pored toga se može pretpostaviti prisutnost Mg_2Si . Za točnu identifikaciju prisutnih faza potrebno je provesti EDS analizu na scanning elektromikroskopu ili provesti ispitivanje

mikrotvrdoće. Također vidljiv je i porozitet u obliku crnih područja. Može se primjetiti i drukčije pozicionirani kristali β^e , koje su grupirani kinesko pismo

AlSi12 sa 13% Si

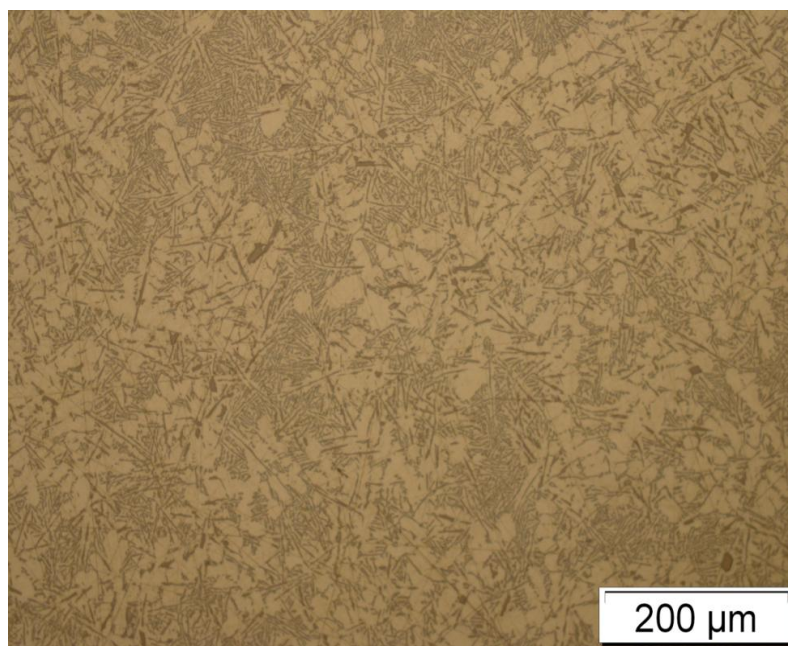


Slika 73. Prikaz mikrostrukture AlSi12 (x100)

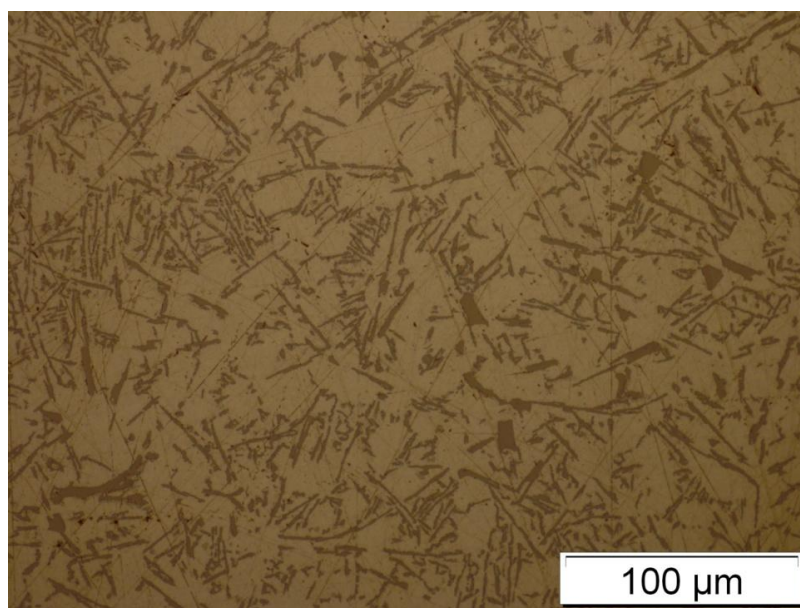


Slika 74. Prikaz mikrostrukture AlSi12 (x200)

Zbog 13% Si dolazi do pojavljivanja β' , te α kristala mješanaca i β^e .

AlSi12 modificiran Modikalitom

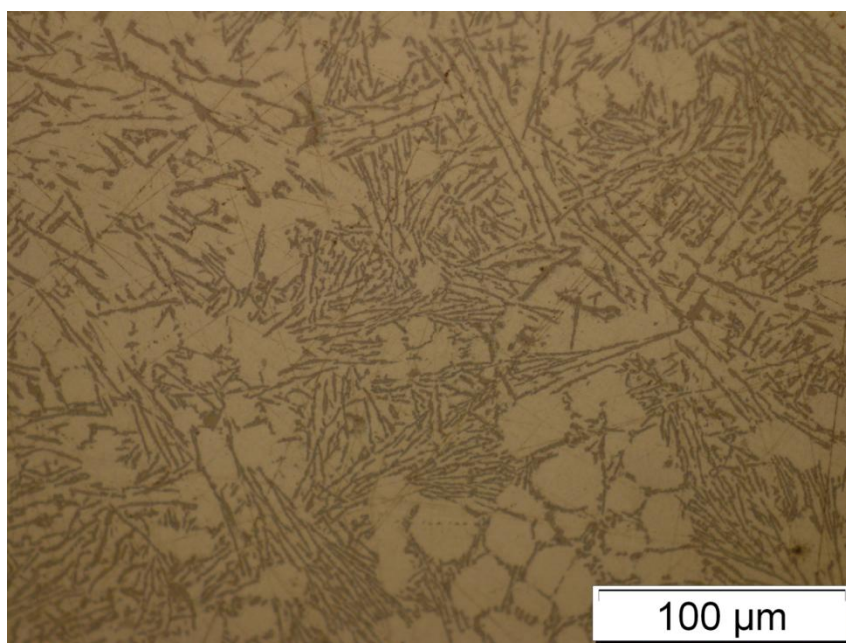
Slika 75. Prikaz mikrostrukture modificiranog AlSi12 (x200)



Slika 76. Prikaz mikrostrukture modificiranog AlSi12 (x500)

AlSi12 s povišenim brojem klica kristalizacije

Slika 77. Prikaz mikrostrukture AlSi12 usitnjenog zrna (X200)



Slika 78. Prikaz mikrostrukture AlSi12 usitnjenog zrna (x500)

7. ZAKLJUČAK

Livljivost je za cijelo najvažnije svojstvo u tehnologiji obrade metala lijevanjem, a vezano je uz sami materijal. Kroz eksperimente se moglo vidjeti kako je velik problem eksperimentalnog lijevanja održavanje konstantnih uvjeta prilikom lijevanja. Ispitivanjem utjecaja livljivosti na AlSi12 leguru, kroz dva eksperimenta, došlo se do određenih rezultata.

Testom spiralnog kanala lijevanjem u jednokratne pješčane kalupe ispitana je livljivost. Tim eksperimentom jasno se potvrdila činjenica kako je livljivost veća s većom temperaturom ulijevanja. Istim eksperimentom se pokazala znatno bolja livljivost AlSi12 legure u odnosu na AlSi12Mg(Cu). Treba reći kako se kod ovog eksperimenta nailazi na problem izrade kalupa. Zbog teške izrade kalupa trebalo bi napraviti znatno više uzoraka kako bi se moglo preciznije definirati odstupanje u eksperimentu, te bolje odrediti livljivost legura.

Drugim dijelom eksperimenta, testom spiralnog kanala u kokili, ispitivana je livljivost u ovisnosti o modificiranosti taljevine, te usitnjenju zrna. Korištenjem predlegure AlTi10, u prethodno određenom omjeru u odnosu na matricu AlSi12 s 13% Si, usitnilo se zrno legure. To je dovelo do bolje livljivost na temperaturama 650°C i 710°C, dok se na 680°C eksperimentom nije povećala livljivost u odnosu na livljivost matrice.

Eksperimentom kod kojeg se modificirala taljevina AlSi12 dobiva se bolja livljivost na temperaturi 650°C, dok na 680°C i 710°C bolja livljivost izostaje. Takav rezultati, osim teške održivost konstantnih uvjeta pri lijevanju, imaju i druga teoretska uporišta. Tu se misli na vremensko ograničenje djelovanja Modikalita u taljevini. Slabljenjem njegovog djelovanja izostalo je povećanje livljivosti kod kasnije lijevanih spirala.

Rezultati koji su dobiveni eksperimentima otvaraju mogućnost za daljnja ispitivanja u svrhu dolaska do preciznijih rezultata po pitanju livljivosti AlSi12 legura. Također postoji mogućnost za preciznije definiranje utjecaja na livljivost sredstvom za modificiranje i/ili usitnjavanje zrna taline.

LITERATURA

- [1] T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indolf : Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.
- [2] Dostupno na: <http://miroslavjakovljevic.iz.hr/o-aluminiju/>
- [3] Dostupno na: <http://www.aluminij.ba/proizvodnja>
- [4] Dostupno na : <http://www.alueurope.eu/production-primary-aluminium-production-evolution-worldwide/>
- [5] Grupa autora: *ASM Handbook Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, ASM International, 1992.
- [6] V. Bižić: *Livljivost sekundarnih aluminijskih slitina*, diplomski rad, Metalurški fakultet u Sisiku, 2009.
- [7] J. Gilbert Kaufman, Elvin L. Rooy: *Aluminium alloy castings-Properties, Processes, and Applications*, AFS,
- [8] Grupa autora: *ASM Handbook Volume 9: Metallography and Microstructures*, ASM International, 2004.
- [9] V.S. Zolotarevsky, N.A. Belov: *Casting aluminium alloys*, Elsevier, 2007.
- [10] Marisa Di Sabatino: *Fluidity of aluminium foundari alloys*, doktorski rad, Norwegian University of Science and Technology, 2005.
- [11] K.R. Ravi, R.M. Pillai, K.R. Amaranathan: *Fluidity of aluminum alloys and composites: A review*, Journal of Alloys and Compounds 456 (2008) 201–210, 2007.
- [12] B.A. Dewhirst: *Castability Control in Metal Casting via Fluidity Measures: Application of Error Analysis to Variations in Fluidity Testing*, WORCESTER POLYTECHNIC INSTITUTE, 2008.
- [13] Dostupno na: <http://hr.wikipedia.org/wiki/Retorta>
- [14] J. Campbell, R. A. Harding: *The Fluidity of Molten Metals*, predavanja, TALAT,
- [15] B. Brcko: *Modifikacija eutektičkogsilicija u Al-Si legurama*, završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012
- [16] T.Mataković, P.Mataković: *Fizikalna metalurgija*, Metalurški fakultet Sisak, 2009
- [17] Dostupno na: <http://openlearn.open.ac.uk/mod/resource/view.php?id=198356>
- [18] Dostupno na: [en.wikipedia.org/wiki/Dendrite_\(metal\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Dendrite_(metal))
- [19] G. Gorše: *Razvoj nove metode za določevanje livnosti aluminijevih zlitin*, Univerza v Ljubljani Naravoslovenotehniška fakulteta, 2009.
- [20] Grupa autora: *ASM Handbook Volume 15: Casting*, ASM International, 1992.

